



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

도시계획학 석사학위논문

신호 연동을 고려한  
주기변동 신호제어모형 개발

Development of a cycle-free signal control model  
considering traffic signal progression

2015년 2월

서울대학교 환경대학원

환경계획학과 교통관리전공

김 거 중

# 신호 연동을 고려한 주기변동 신호제어모형 개발

지도교수 이 영 인

이 논문을 도시계획학 석사학위논문으로 제출함

2014년 10월

서울대학교 환경대학원

환경계획학과 교통관리전공

김 거 중

김거중의 도시계획학 석사학위论문을 인준함

2014년 12월

위 원 장 \_\_\_\_\_(인)

부위원장 \_\_\_\_\_(인)

위 원 \_\_\_\_\_(인)

## 국 문 초 록

주기변동(Cycle-free)기반 신호제어모형은 실시간 신호제어모형 중 하나로써 최근 교통혼잡 완화를 위해 활발히 연구되고 있다. 주기변동 신호제어모형은 주기길이를 매 주기마다 교통량 상황에 맞게 변화시켜 통과차량들의 총 지체시간을 최소화 할 수 있다는 장점이 있지만, 인접한 교차로 간 신호 연동을 고려하기 어렵다는 단점 또한 지닌다.

신호를 연동시키기 위해서는 일반적으로 연동된 신호교차로 간 신호 주기길이를 일치시켜야 하지만, 주기변동기반 신호제어기법은 각 교차로의 교통상황에 맞춰 매 주기마다 신호주기길이를 변경하기 때문에 교차로 간 신호를 연동시키기 힘들다. 또한 신호 연동을 고려할 수 있는 방법이 존재한다 해도, 연동을 위해서는 교차로 간 교통상황(ex. 대기행렬 길이)을 정확히 예측해야하는데, 현실에서는 예측할 수 없는 다양한 변수가 존재하기 때문에 효율적인 신호 연동을 구현하기 어렵다.

이러한 단점에도 불구하고 현실에서는 신호 연동이 필요한 상황이 여전히 존재한다. 침두시 방향성을 지닌, 양방향 비대칭 교통상황이 발생하는 도심의 주요 간선도로의 경우, 단순히 모든 방향의 지체시간을 최소화하여 신호를 최적화하는 것보다 특정방향의 신호 연동을 고려하여 신호를 제어하는 것이 더 효율적일 수 있다.

이에 본 연구에서는 기존의 주기변동 신호제어모형(이하 기존모형)의 성능 저하 없이 신호 연동을 고려할 수 있는 방법론을 개발하고, 기존모형과 비교를 통해 연동성 및 지체도 측면에서 어떠한 효과가 있는지 검토하였다. 또한 신호 연동 고려 시 대기행렬 길이 예측에 따른 연동값(offset) 예측오차를 최소화하기 위해서 예측값과 실측값의 차이정보를 이용하여 실시간으로 신호 연동값을 보정할 수 있는 방법을 고려해 본 모형의 연동성을 향상시켰다.

2개의 교차로로 이루어진 소규모 네트워크에서 본 모형의 효과를 분석한 결과, 기존모형에 비해 연동방향의 지체도 및 연동성은 각각 23%,

32% 향상되었고, 전체 네트워크 측면의 지체도 및 연동성은 각각 1% 저하, 2% 향상되었다. 이러한 평가척도의 차이가 통계적으로 유의한지 추가적으로 통계분석을 실시한 결과, 전체 네트워크 측면의 지체도를 제외한 나머지 평가척도의 차이는 유의한 것으로 분석되었다. 따라서 본 모형은 전체 네트워크 측면에서 지체도 및 연동성의 저하 없이 연동방향의 연동성을 크게 향상 시킨다고 할 수 있다.

또한 다수의 교차로로 이루어진 네트워크에서도 확장 적용 가능한지 살펴보기 위해 다수 교차로를 대상으로 다양한 연동규모(연동교차로 수)의 신호 연동을 실시하여 효과를 비교 분석하였다. 그 결과, 6개 교차로를 모두 연동시킨 모형이 가장 높은 성능을 보이는 것으로 나타났다. 기존모형에 비해 연동방향의 지체도 및 연동성은 각각 33%, 49% 향상되었고, 전체 네트워크 측면의 지체도 및 연동성은 각각 1%, 5% 향상되었다.

마지막으로 지금까지 비대칭 교통량을 지닌 네트워크를 대상으로 분석한 것과 달리, 양방향 대칭 교통량을 지닌 네트워크에서의 효과를 비교 분석하였다. 그 결과, 지체도 및 연동성 향상효과는 연동방향의 경우 비대칭 교통량 네트워크에서 각각 33%, 49%, 대칭 교통상황에서는 34%, 49%로 효과가 미미하게나마 증가하는 것으로 나타났지만, 전체 네트워크 측면에서는 비대칭 교통상황에서 1%, 5%, 대칭 교통상황에서는 -2%, 4%로 지체도 및 연동성의 개선효과는 오히려 감소한 것으로 분석되었다.

종합해보면, 본 연구에서 제시한 방법론은 기존모형 대비 전체 네트워크의 지체도 및 연동성 저하 없이 연동방향의 연동성을 크게 향상시킬 수 있으며, 교통량이 양방향 대칭인 교통상황보다 비대칭 교통량을 지닌 교통상황에서 신호 연동을 실시할 때 상대적으로 더 나은 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

◆ 주요어 : 신호 연동, 주기변동, 신호 제어, 연동값 보정

◆ 학 번 : 2013-21982

## <목 차>

I . 서론 .....	1
1. 연구의 배경 및 목적 .....	1
2. 연구의 방법 및 연구 범위 .....	3
II . 이론적 배경 및 선행 연구 고찰 .....	5
1. 이론적 배경 .....	5
1) 신호 연동의 정의 .....	5
2) 신호 연동화 이론 .....	7
3) 주기변동 신호제어모형 .....	10
2. 선행 연구 고찰 .....	12
1) 주기변동 신호제어모형 .....	12
2) 신호교차로 대기행렬 예측 .....	17
3) 본 연구의 차별성 .....	22
III . 신호 연동을 고려한 주기변동 신호제어 방법론 .....	25
1. 신호 연동을 고려한 주기변동 신호제어 방법론 구축 .....	25
1) $t=t_1$ (교차로1의 첫 번째 신호 주기 시작시점) .....	26
2) $t=t_2$ (교차로2의 첫 번째 신호 주기 시작시점) .....	27
3) $t=t_3$ (교차로1의 두 번째 신호 주기 시작시점) .....	29
4) $t=t_4$ (교차로2의 두 번째 신호 주기 시작시점) .....	30

2. 유전자 알고리즘을 이용한 주기길이 및 현시길이 최적화 모형 .....	32
1) 유전자 구조 .....	32
2) 유전자 연산자 .....	35
3) 목적함수(적합도 함수) .....	37
4) 기초변수 산출 .....	39
3. 연동값(offset) 산정모형 .....	40
1) 대기행렬 길이 예측 .....	40
<b>IV. 모형 적용 결과 및 비교분석 .....</b>	<b>47</b>
1. 분석 방법론 개요 .....	47
2. 시뮬레이터 및 분석 프로그램 개요 .....	48
3. 기존의 주기변동 신호제어모형과 비교 .....	49
1) 분석 대상 네트워크 .....	49
2) 비교 대상 모형 .....	51
3) 비교 분석 결과 .....	54
4. 다수 교차로 확장 적용 및 연동규모 변화에 따른 효과비교 ...	72
1) 다수 교차로에 적용 가능한 확장 방법론 .....	72
2) 연동규모 변화에 따른 연동효과 분석 .....	75
5. 양방향 대칭/비대칭 교통량을 지닌 네트워크에서의 효과비교 ....	81
<b>V. 결론 및 향후 연구과제 .....</b>	<b>85</b>
1. 결론 .....	85
2. 연구의 한계 및 향후 연구과제 .....	87
■ 참고문헌 .....	89

<부록 1> 연동방향 지체도의 정규성 검정 결과 (교차로 6개) .....	91
<부록 2> 비교모형별 연동방향 지체도 등분산성 검정 결과 (교차로 6개) ....	91
<부록 3> 비교모형별 연동방향 지체도의 t-검정 및 Welch's t-검정 결과 (교차로 6개) .....	91
<부록 4> 연동방향 연동성의 정규성 검정 결과 (교차로 6개) .....	91
<부록 5> 비교모형별 연동방향 연동성 등분산성 검정 결과 (교차로 6개) ....	92
<부록 6> 비교모형별 연동방향 연동성의 t-검정 및 Welch's t-검정 결과 (교차로 6개) .....	92
<부록 7> 네트워크 지체도의 정규성 검정 결과 (교차로 6개) .....	92
<부록 8> 비교모형별 네트워크 지체도 등분산성 검정 결과 (교차로 6개) ....	92
<부록 9> 비교모형별 네트워크 지체도의 t-검정 및 Welch's t-검정 결과 (교차로 6개) .....	93
<부록 10> 네트워크 연동성의 정규성 검정 결과 (교차로 6개) .....	93
<부록 11> 비교모형별 네트워크 연동성 등분산성 검정 결과 (교차로 6개) ..	93
<부록 12> 비교모형별 네트워크 연동성의 t-검정 및 Welch's t-검정 결과 (교차로 6개) .....	93
<부록 13> 연동방향 지체도의 정규성 검정 결과 (양방향 대칭 교통량) .....	94
<부록 14> 로그 변환한 연동방향 지체도의 정규성 검정 결과 (양방향 대칭 교통량) .....	94
<부록 15> 비교모형별 연동방향 지체도 Mann-Whitney U 검정 결과 (양방향 대칭 교통량) .....	94
<부록 16> 비교모형별 네트워크 지체도 Mann-Whitney U 검정 결과 (양방향 대칭 교통량) .....	94
<부록 17> 연동방향 연동성의 정규성 검정 결과 (양방향 대칭 교통량) .....	95



<부록 18> 로그 변환한 연동방향 연동성의 정규성 검정 결과 (양방향 대칭 교통량) .....	95
<부록 19> 비교모형별 연동방향 연동성 Mann-Whitney U 검정 결과 (양방향 대칭 교통량) .....	95
<부록 20> 비교모형별 연동방향 연동성 Mann-Whitney U 검정 결과 (양방향 대칭 교통량) .....	95
<부록 21> 네트워크 지체도의 정규성 검정 결과 (양방향 대칭 교통량) .....	96
<부록 22> 로그 변환한 네트워크 지체도의 정규성 검정 결과 (양방향 대칭 교통량) .....	96
<부록 23> 비교모형별 네트워크 지체도 Mann-Whitney U 검정 결과 (양방향 대칭 교통량) .....	96
<부록 24> 비교모형별 연동방향 연동성 Mann-Whitney U 검정 결과 (양방향 대칭 교통량) .....	96
<부록 25> 네트워크 연동성의 정규성 검정 결과 (양방향 대칭 교통량) .....	97
<부록 26> 비교모형별 네트워크 연동성 등분산성 검정 결과 (양방향 대칭 교통량) .....	97
<부록 27> 비교모형별 네트워크 연동성의 t-검정 및 Welch's t-검정 결과 (양방향 대칭 교통량) .....	97

## 〈표 차례〉

<표 1> 세대별 신호제어 시스템의 특징 .....	10
<표 2> 본 연구의 차별성 .....	23
<표 3> 현시순서 및 현시번호 설정 .....	33
<표 4> 비대칭 교통상황 발생 지점의 평일 오전 침두(8시~9시)시 유입/유출 교통량 ...	50
<표 5> 수정된 기존연동모형의 목적함수 .....	53
<표 6> 모형별 신호 연동방향의 지체도 비교 (교차로 2개) .....	60
<표 7> 모형별 신호 연동방향의 연동성 비교 (교차로 2개) .....	60
<표 8> 모형별 전체 네트워크의 지체도 비교 (교차로 2개) .....	60
<표 9> 모형별 전체 네트워크의 연동성 비교 (교차로 2개) .....	60
<표 10> 연동방향 지체도의 정규성 검정 결과 .....	62
<표 11> 로그 변환한 연동방향 지체도의 정규성 검정 결과 .....	62
<표 12> 비교모형별 연동방향 지체도 등분산성 검정 결과 .....	63
<표 13> 비교모형별 연동방향 지체도의 t-검정 및 Welch's t-검정 결과 .....	63
<표 14> 비교모형별 연동방향 지체도 Mann-Whitney U 검정 결과 .....	64
<표 15> 연동방향 연동성의 정규성 검정 결과 .....	65
<표 16> 로그 변환한 연동방향 연동성의 정규성 검정 결과 .....	66
<표 17> 비교모형별 연동방향 연동성의 등분산성 검정 결과 .....	66
<표 18> 비교모형별 연동방향 연동성의 독립표본 t검정 결과 .....	67
<표 19> 네트워크 지체도의 정규성 검정 결과 .....	67
<표 20> 로그 변환한 네트워크 지체도의 정규성 검정 결과 .....	67
<표 21> 비교모형별 네트워크 지체도 Mann-Whitney U 검정 결과 .....	68

<표 22> 네트워크 연동성의 정규성 검정 결과 .....	68
<표 23> 비교모형별 네트워크 연동성의 등분산성 검정 결과 .....	68
<표 24> 비교모형별 네트워크 연동성의 t-검정 및 Welch's t-검정 결과 .....	68
<표 25> 비교모형별 네트워크 연동성 Mann-Whitney U 검정 결과 .....	69
<표 26> 비대칭 교통상황 발생 지점에 속한 도로축의 교차로수 .....	75
<표 27> 모형별 신호 연동방향의 지체도 비교 (교차로 6개) .....	79
<표 28> 모형별 신호 연동방향의 연동성 비교 (교차로 6개) .....	79
<표 29> 모형별 네트워크의 지체도 비교 (교차로 6개) .....	79
<표 30> 모형별 네트워크의 연동성 비교 (교차로 6개) .....	79
<표 31> 연동방향 지체도의 정규성 검정 결과 (모형3-3, 모형6) .....	82
<표 32> 연동방향 지체도 등분산성 검정 결과 (모형3-3, 모형6) .....	82
<표 33> 연동방향 지체도의 t-검정 결과 (모형3-3, 모형6) .....	82
<표 34> 모형별 신호 연동방향의 지체도 비교 (양방향 대칭 교통상황) .....	83
<표 35> 모형별 신호 연동방향의 연동성 비교 (양방향 대칭 교통상황) .....	83
<표 36> 모형별 네트워크의 지체도 비교 (양방향 대칭 교통상황) .....	83
<표 37> 모형별 네트워크의 연동성 비교 (양방향 대칭 교통상황) .....	83
<표 38> 대칭/비대칭 교통상황별 평가지표 비교 .....	84

## <그림 차례>

<그림 1> 연구흐름도 .....	4
<그림 2> 신호교차로에서 차량queued 시공도 .....	5
<그림 3> 신호 연동시스템별 시공도 .....	9
<그림 4> 차량도착분포 가정 .....	13
<그림 5> 대기행렬 상황 1 .....	18
<그림 6> 대기행렬 상황 2 .....	19
<그림 7> 대기행렬 상황 3 .....	20
<그림 8> 예시 교차로 .....	25
<그림 9> 교차로1 첫 번째 주기 시작시점( $t_1$ )의 작업순서 .....	26
<그림 10> 교차로2 첫 번째 주기 시작시점( $t_2$ )의 작업순서 .....	28
<그림 11> 교차로1 두 번째 주기 시작시점( $t_3$ )의 작업순서 .....	30
<그림 12> 교차로2 두 번째 주기 시작시점( $t_4$ )의 작업순서 .....	31
<그림 13> 염색체(Chromosome) 구조 .....	33
<그림 14> 반복횟수에 따른 적합도(지체시간) 변화 .....	36
<그림 15> 대기행렬길이 예측 대상시점 .....	41
<그림 16> 대기행렬 길이 예측을 위한 교통류 밀집유형 .....	42
<그림 17> 분석 프로그램의 프레임워크 .....	48
<그림 18> 분석대상 네트워크 .....	49
<그림 19> VISSIM으로 구현된 교차로 .....	49
<그림 20> 방향별 비대칭 평일교통량 발생 지점 .....	50
<그림 21> 모형별 교차로별 주기길이 변화 .....	55

<그림 22> 모형별 교차로별 연동방향의 누적 대기차량수 .....	56
<그림 23> 모형별 교차로별 모든 방향의 누적 대기차량수 .....	57
<그림 24> 모형별 교차로별 연동방향의 누적 통과차량수 .....	58
<그림 25> 모형별 교차로별 모든 방향의 누적 통과차량수 .....	58
<그림 26> 주도로를 통과하는 차량들의 궤적(시공도) .....	59
<그림 27> 모형별 평가척도 .....	59
<그림 28> 비교모형별 연동방향 지체도 Mann-Whitney U 검정 결과 ....	64
<그림 29> 비교모형별 네트워크 지체도 Mann-Whitney U 검정 결과 ....	67
<그림 30> 비교모형별 네트워크 연동성 Mann-Whitney U 검정 결과 ....	69
<그림 31> 모형별 연동방향 신호현황(시공도) .....	70
<그림 32> 시간흐름에 따른 4단계 방법론 구분 .....	73
<그림 33> 다수 교차로에 적용 가능한 일반화 방법론 순서도 .....	74
<그림 34> 분석 대상 네트워크 (6개 교차로) .....	76
<그림 35> 주도로를 통과하는 차량들의 궤적(시공도), (교차로 6개) .....	78
<그림 36> 모형별 평가척도 (교차로 6개) .....	78
<그림 37> 모형별 연동방향 신호현황(시공도), (교차로 6개) .....	80
<그림 38> 모형별 평가척도 (양방향 대칭 교통상황) .....	82

# I. 서론

## 1. 연구의 배경 및 목적

1960년대 정부 주도의 ‘경제개발 5개년 계획’ 시행 이후, 국토의 균형개발 및 국민의 이동권 향상을 위해 우리나라는 교통 SOC에 많은 예산을 투자하였다. 그 결과, 도로 및 철도를 비롯한 여러 가지 교통시설을 확충할 수 있었지만 교통혼잡이라는 부(負) 편익 또한 발생하게 되었다.

교통혼잡을 해결하기 위해 정부는 도로용량을 늘리는 등 추가적인 교통시설 공급에 초점을 맞춘 정책들을 시행하였다. 하지만 교통시설 확충은 추가적인 통행수요를 유발시켜 교통혼잡을 더욱 가중시키게 되었고, 그 결과 교통혼잡에 대한 이슈는 지금까지도 문제가 되고 있다.

최근에는 교통시설 확충이 아닌 혼잡통행료 및 자동차 10부제와 같이 운영방식에 변화를 주는 교통정책들을 도입하기 시작하였다. 교차로 신호 운영체제 개선도 그 중 한 예로 볼 수 있다. 서울시는 1990년대 이후 날로 심각해지는 교통혼잡을 해소할 수 있는 방안으로 신(新) 신호제어시스템인 COSMOS(Cycle, Offset, Split MOdel of seoul)를 개발하였다. 교통량 변화와 상관없이 24시간 동일한 신호로 제어하는 기존 신호제어와는 달리, COSMOS는 도로에 설치된 차량검지기에서 수집된 자료를 실시간으로 분석하여 교통상황에 맞는 신호주기 및 현시시간을 자동으로 설정·운영하는 실시간 신호제어시스템이다.

본 연구에서 초점을 두고 있는 주기변동(Cycle-free)기반 동적신호제어기법 역시 실시간 신호제어기법 중 하나로써, 최근 교통혼잡 완화를 위해 활발히 연구되고 있다. 기존의 정주기식 신호제어기법과는 달리 교통상황에 맞춰 교차로별 매주기마다 주기길이와 현시별 신호시간을 결정하기 때문에 ‘주기변동(Cycle-free)’이라는 용어를 사용하고 있다.

주기변동 신호제어기법은 주기길이를 매 주기마다 교통량 상황에 맞게 변화시킴으로써 통과차량들의 총 지체시간을 최소화 할 수 있다는 장점이 있지만 인접한 교차로간의 신호 연동을 고려하기 어렵다는 단점 또한 지니고 있다. 신호 연동방식에 따라 다르지만, 일반적으로 신호를 연동시키기 위해서는 연동된 신호교차로 간 신호 주기길이를 일치시켜야 한다. 그러나 주기변동기반 신호제어기법은 각 교차로의 교통상황에 맞춰 매 주기마다 신호주기길이를 변경하기 때문에 교차로 간 신호를 연동시키기 힘들다.

이러한 주기변동 신호제어기법의 단점에도 불구하고 일부 선행연구에서는 신호 연동성을 향상시킬 수 있는 방법을 제시하기도 하였다. 하지만 이런 연구들은 상류교차로를 통과하는 차량이 하류 교차로의 신호를 이용할 때 정지하지 않고 통과하도록 하는 진정한 의미의 신호 연동이 아닌, 연동방향의 신호시간을 늘려주어 연동성을 향상시키는 제한적인 의미의 신호 연동을 고려하였다는 한계점이 있다. 또한 현실세계와 달리 이상적인 교통상황을 가정하기 때문에 실무 적용이 어렵다는 단점이 있다. 실제 교차로에서는 선행연구들의 이상적인 가정과는 달리 예측할 수 없는 다양한 변수들이 존재하며 교통상황 역시 시시각각 변화하기 때문에 선행연구에서 제시하는 연동효과는 기대하기 어려울 것으로 추정된다.

그럼에도 불구하고 현실에서는 연동성을 요하는 상황이 여전히 존재한다. 첨두시 방향성을 지닌 양방향 비대칭 교통상황이 발생하는 도심의 주요 간선도로의 경우, 단순히 모든 방향의 지체시간을 최소화하여 신호를 최적화하는 것보다 특정방향의 신호 연동을 고려하여 신호를 제어하는 것이 전략적으로 더 중요할 수 있다.

또한 운전자는 교차로의 지체시간 감소보다 정지 없이 여러 교차로를 통과할 때 체감적으로 더 큰 효용을 얻기 때문에 신호 연동은 여전히 중요하다고 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 기존의 주기변동기반 신호제어모형의 성능 저하 없이 신호 연동을 고려할 수 있는 방법론을 개발하고, 기존의 주기변동기반 신호제어모형과 비교를 통해 연동성 및 지체도 측면에서 어떠한 효과가 있는지 비교 검토해 보고자 한다.

## 2. 연구의 방법 및 연구 범위

본 연구의 주목표는 신호 연동을 고려할 수 있는 주기변동기반 실시간 신호제어 방법론을 제시하고 그 효과를 확인하는 것에 있다. 따라서 먼저 기존의 주기변동 신호제어모형 및 신호 연동화 이론에 대해 살펴보고, 이를 바탕으로 신호 연동을 고려할 수 있는 주기변동기반 실시간 신호제어 방법론을 구축하고자 한다. 또한 제시한 방법론이 실제로 연동효과를 가져오는지 시뮬레이션 분석을 통해 확인하고자 한다.

모형 분석 및 평가는 크게 세 가지로 나뉜다.

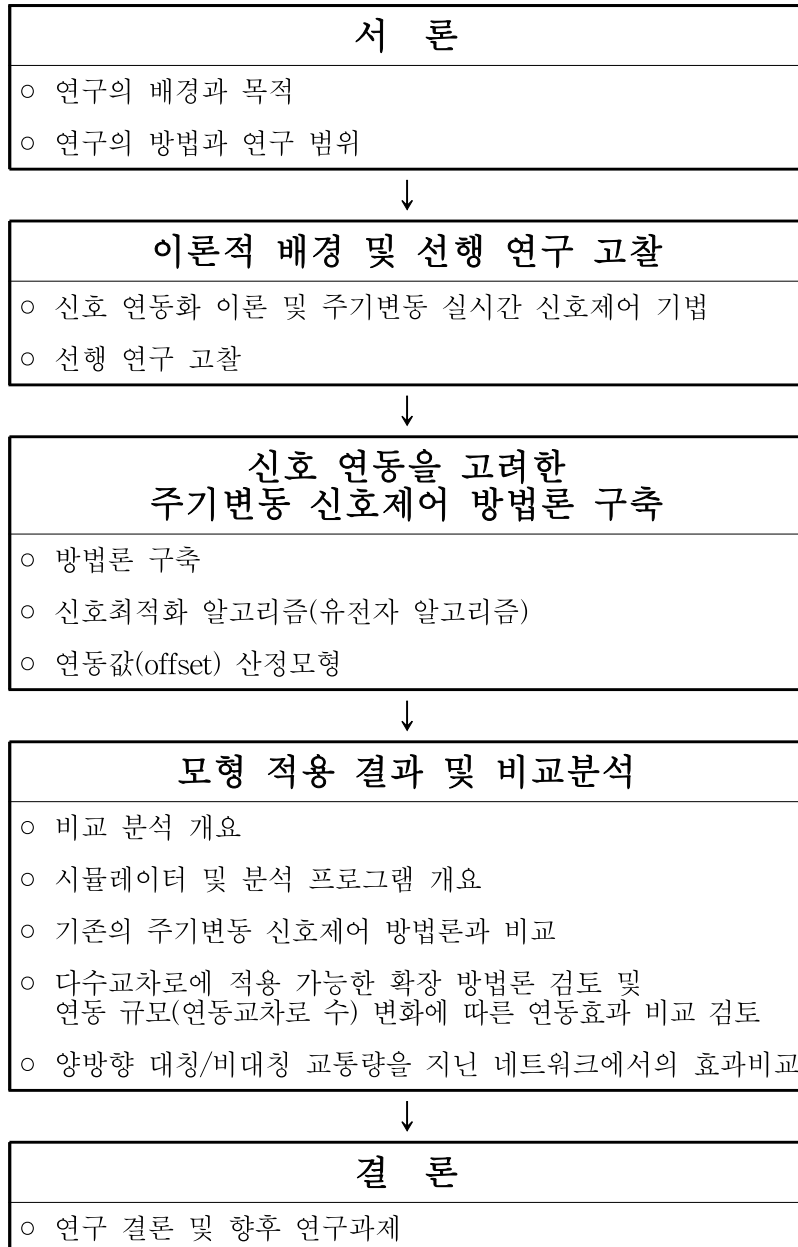
첫째, 본 방법론의 연동 효과를 살펴보기 위해 2개 교차로로 이루어진 소규모 네트워크에서 기존의 주기변동기반 신호제어모형과 평가척도를 비교, 검토한다. 특히 본 연구에서 제시한 방법론이 기존 주기변동기반 신호제어모형에 비해 연동성 및 지체도에 어떠한 영향을 미치는지 분석한다.

둘째, 본 방법론이 소규모 네트워크뿐만 아니라 다수의 교차로로 이루어진 네트워크에서도 확장 적용 가능한지 살펴보기 위해 다수 교차로에서 신호 연동시의 효과를 비교 분석하고, 더 나아가 다양한 연동규모에서의 연동효과를 비교하여 주어진 시나리오에서 신호 연동 시 최대 효과를 발휘 할 수 있는 교차로 연동규모를 검토해 보고자 한다.

셋째, 지금까지 비대칭 교통량을 지닌 네트워크를 대상으로 분석한 것과 달리, 양방향 대칭 교통량을 지닌 네트워크에서의 효과를 분석하여 비대칭 교통량 네트워크 대비 어떠한 차이가 있는지 비교 분석한다.



본 연구의 연구 흐름도는 <그림 1>과 같다.



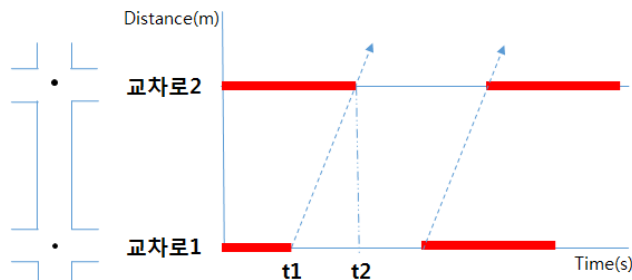
<그림 1> 연구흐름도

## II. 이론적 배경 및 선행 연구 고찰

### 1. 이론적 배경

#### 1) 신호 연동의 정의

신호 연동이란 인접한 교차로를 통과하는 차량이 다음 교차로를 지나갈 때 정지하지 않고 통과하도록 신호를 연계하는 것이다. 연동에 대한 이해를 돕기 위해 연속된 2개의 신호교차로를 시공도(Time-Space Diagram)로 표현하면 <그림 2>와 같다. 시공도에서 굵은 선(—)은 신호등의 적색신호를 의미하며 실선(-)은 유효녹색신호를 의미한다. 점선은 시간에 따른 차량의 궤적을 의미한다. 그림에서  $t=t_1$ 일 때 첫 번째 교차로의 신호가 적색에서 녹색으로 바뀌며, 차량은 출발하게 된다. 그리고 시간이 흘러  $t=t_2$ 일 때 두 번째 교차로의 신호가 적색에서 녹색으로 바뀌게 된다. 만약  $t_1$ 에 첫 번째 교차로에서 출발한 차량이 두 번째 교차로에 도착하는 시점과 두 번째 교차로 신호가 녹색으로 바뀌는 시점이 일치한다면, 이 차량은 정지 없이 두 번째 교차로를 통과할 수 있게 된다. 이렇듯 신호 연동을 위해서는 연속된 두 교차로의 녹색신호 간 시간 차이가 무엇보다 중요하며, 일반적으로 연속된 두 교차로 간 녹색 신호 시간차( $t_2 - t_1$ )를 연동값 또는 오프셋(offset)이라 부른다.



<그림 2> 신호교차로에서 차량궤적 시공도

이상적인 연동값은 전술한 바와 같이 상류(upstream) 교차로에서 녹색신호를 받고 출발한 차량이 하류(downstream) 교차로에 도착했을 때 하류 교차로 신호를 녹색으로 바꿔주는 것이다. 따라서 이상적인 연동값은 아래의 식(2.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_{ideal} = L/S \quad \dots(2.1)$$

$t_{ideal}$  : 이상적인 연동값(s)  
 $L$  : 교차로간 거리(m)  
 $S$  : 평균속도(m/s)

단, 위의 식은 상류 교차로에서 녹색신호를 받고 하류 교차로에 도달했을 때 대기차량이 없을 시에만 성립된다. 만약 하류 교차로에 대기차량이 존재한다면, 상류 교차로에서 녹색신호를 받고 출발한 차량은 하류 교차로의 대기차량에 영향을 받아 하류교차로까지 이동하는데  $t_{ideal}$ 보다 더 많은 시간을 필요로 하게 된다. 따라서 하류교차로의 대기차량을 고려하기 위해서는 상류교차로에서 출발한 차량이 하류교차로에 도착하기 전에 하류 교차로의 신호를 녹색으로 바꿔주어 대기차량을 먼저 처리해야 한다. 이를 식에 반영하면 연동값(offset) 산정식은 식(2.2)와 같이 수정된다.

$$t_{ideal} = L/S - (Qh + l_1) \quad \dots(2.2)$$

$t_{ideal}$  : 이상적인 연동값(s)  
 $L$  : 교차로간 거리(m)  
 $S$  : 평균속도(m/s)  
 $Q$  : 차로 당 대기차량수(대)  
 $h$  : 대기차량 처리시간(s/대)  
 $l_1$  : 출발손실시간(s)

## 2) 신호 연동화 이론<sup>1)</sup>

일반적으로 신호 연동시스템은 신호 연동 운영방식에 따라 연속진행 연동시스템(Progression), 교호 연동시스템(Alternating Progression), 동시 연동시스템(Simultaneous Progression) 등으로 구분 된다. 연속진행 연동시스템은 위에서 살펴본 연동값(offset)을 이용한 한 방향(one-way) 연동방식인 것에 반해, 교호연동시스템 및 동시연동시스템은 연동값이 아닌, 교차로간 거리, 교차로별 신호주기시간 및 차량평균속도의 관계에 따라 설정된 인접 교차로 간 신호패턴에 의해 운영되는 양방향(two-way) 연동방식이라는 점에서 차이가 있다.

### (1) 연속진행 연동시스템(Progression)

연속진행 연동시스템은 첫 번째 교차로에서 출발한 차량이 각 교차로에 도착 할 때 마다 각 교차로의 신호를 녹색으로 바꾸어 주는 시스템이다. 따라서 각 교차로 간 녹색신호 시간 차이는 앞에서 살펴보았던 이상적 연동값 산정식(2.2)을 통해 산정한다. 이 운영방식은 한 방향의 연동 또는 한방향의 교통량이 상대적으로 많은 비대칭 양방향 연동에 효과적이며, 차량의 진행순서에 따라 각 교차로의 녹색신호가 켜지기 때문에 전방진행 연동시스템(Forward Progression)으로 불리기도 한다.

교차로 간 대기행렬이 상대적으로 많은 경우, 연동값이 음수가 될 수 있다. 이 경우, 상류교차로에서 출발한 차량이 하류교차로에 도착하기 전에 하류교차로의 대기차량을 처리하기 위해서 하류교차로의 녹색신호는 상류교차로의 녹색신호보다 먼저 켜져야 한다. 이렇게 상대적으로 많은 대기차량을 고려하기 위해서 상류교차로의 신호보다 하류교차로의 녹색신호를 먼저 주는 운영방식을 역진행 연동시스템(Reverse Progression)이라 부른다. <그림 3>의 a는 링크거리가 300m이고 차량속도가 30m/s,

---

1) 신호 연동화 이론은 Roess 외(2004)의 「TRAFFIC ENGINEERING 3rd ed.」의 내용을 요약 정리 하였다.

교차로 간 대기행렬이 평균 6대일 때의 시공도이다.

### (2) 동시연동시스템(Simultaneous Progression)

인접한 교차로간 거리가 짧거나 차량속도가 높아 상대적으로 교차로 간 이동시간이 짧을 때에는 인접한 교차로 간 신호를 같이 점등하는 것이 최적일 때가 있다. 이와 같이 인접한 교차로 간 신호를 동시에 할당하는 운영방식을 동시시스템이라 부른다. 이 운영 방식의 경우 각 교차로의 방향별 신호배분시간은 동일하며, 각 교차로 간 연동값은 0이다. 즉, 교차로 간 연동값은 고려하지 않고 인접 교차로 간 신호 패턴만 고려하는 연동방식이다. 동시연동시스템을 시공도로 표현하면 <그림 3>의 b와 같다.

### (3) 교호연동시스템(Alternating Progression)

인접한 교차로의 신호가 서로 반대로 점등되는 방식이다. 이 운영방식은 교차로간 거리가 모두 균일하고 녹색시간과 적색시간의 시간분할이 50:50이어야 효과를 볼 수 있다. 이때 적정 연동값은 신호주기시간의 1/2이며, 신호주기시간은 다음과 같이 산정 할 수 있다.

$$C/2 = L/S \quad \dots(2.3)$$

$C$  : 신호 주기 시간(s)

$L$  : 교차로간 거리(m)

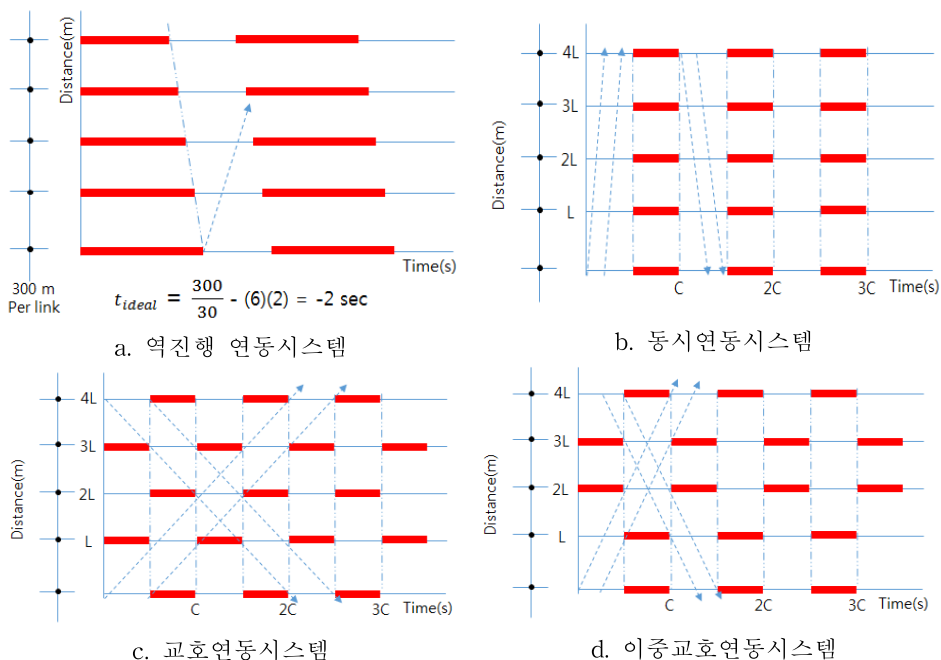
$S$  : 평균속도(m/s)

이 운영방식을 시공도로 나타내면 <그림 3>의 c와 같다. 그림과 같이 인접한 교차로의 신호와 반대로 점등되기 때문에 ‘교호(Alternating)’ 시스템이라 불리며, 교차로 간 거리만 동일하다면 교차로수와 상관없이 쉽게 연동될 수 있다는 장점이 있다. 하지만 주도로와 부도로가 만나는 교차로에서 주도로 방향으로 교호연동시스템을 사용한다면, 주도로의 녹색신호와 적색신호의 시간분할을 50:50으로 설정함으로써 부도로의 녹색신호 시간분할을 주도로의 적색신호시간 안에서 배분해야하는 비효율

성이 존재한다. 또한 앞에서 언급한 바와 같이 교차로간 거리가 동일한 경우에만 효과를 볼 수 있기 때문에 실무 적용에 많은 어려움이 따른다.

#### (4) 이중 교호연동시스템(Double-Alternating Progression)

교호시스템과 유사하게 인접한 교차로의 신호가 반대로 점등되는 운영방식이다. 하지만 교호시스템과 다르게 두 개의 교차로가 한 조가 되어 운영된다는 차이가 존재한다. 이중 교호연동시스템은 교차로 이동거리가 신호주기의 1/4일 때 주로 사용된다. 따라서 적정 신호주기시간( $C$ )이 정해져 있을 때, 교차로 간 이동시간이  $C/2$ 와 유사할 경우에는 교호시스템,  $C/4$ 와 유사할 경우에는 이중 교호시스템을 선택할 수 있다. 하지만 교호시스템과 마찬가지로 교차로간 거리는 동일해야 하며, 여전히 부도로 신호배분의 비효율성이 존재한다.



<그림 3> 신호 연동시스템별 시공도

### 3) 주기변동 신호제어모형

정주기 신호제어 기법은 교통축의 연동성을 확보하기 위해 먼저 교차로 제어그룹(Sub-Area: SA)을 대상으로 중요교차로와 동일한 신호주기를 갖도록 최적신호 주기를 우선적으로 설정한 후, 교차로 간 평균대기행렬 길이를 고려한 연동값(offset)을 적용하여 연계된 신호교차로 간 현시시간을 최종 할당한다.

하지만 실제 교통상황에서는 차량 간 상호영향으로 인해 발생하는 다양한 이유로 평균 대기차량의 길이는 시간에 따라 다양하게 변화한다. 따라서 기존의 신호시간 계산방법으로는 실시간으로 변화하는 적정신호주기와 적정 연동값을 동시에 만족하는 신호시간을 산출하는 데에는 많은 어려움이 따른다.(최완석 외, 2002)

이런 문제를 해결하기 위해서 개발된 실시간 교통대응 On-line 교통제어 시스템 UTCS(Urban Traffic Control System)는 3세대 신호제어 소프트웨어로서 매 신호주기마다 주기길이에 변화를 줄 수 있다는 특징이 있다. 이러한 주기길이 변동가능 여부는 고정주기기반으로 신호제어가 이루어지는 1, 2세대와 3세대를 구분하는 주요 요소이다. 세대별 신호시스템의 주요특징을 살펴보면 <표 1>과 같다.

<표 1> 세대별 신호제어 시스템의 특징

세대특징	1세대	2세대	3세대
제어유형	off-line	on-line	on-line
변경빈도	15분	5분	2~3.5분
시간계획수	40개까지 (7개 사용)	제한 없음	제한 없음
교통예측	무	유	유
중요교차로 제어	분할비 조정연동	분할비, 옹셋변동	분할비, 옹셋, 주기변동
제어계층구조	패턴선택	패턴계산	혼잡, 중간 교통흐름
주기길이 고정여부	각 구간 내에서 고정	교차로의 변경 그룹 내에서 고정	주기길이 변경

출처 : 이영인·최완석·임재승(2001), 지체도 최소화를 위한 주기변동기반 동적신호시간 결정모형 개발, 대한교통학회지, 19(1): 116

1세대 신호시스템은 정주기식 신호제어방식과 패턴선택식 신호제어방식으로 구분된다. 정주기식 신호제어방식은 사전에 수집된 요일별 시간별 교통량 정보를 기반으로 설정된 최적 신호전략을 이용하여 정해진 시간대에 신호전략을 사용하는 방식이다. 이에 반해 1.5세대 신호시스템으로도 불리는 패턴선택식 신호제어 방식은 최적 신호전략을 미리 설정해 둔다는 점에서 정주기식 신호제어방식과 유사하지만, 해당 시간대 수집된 교통정보를 바탕으로 미리 설정된 신호전략 중 적합한 신호전략(패턴)을 선택한다는 점에서 차이가 있다.

2세대 신호시스템은 교통대응 신호제어방식으로 실시간으로 수집된 교통정보 데이터를 바탕으로 최적 신호전략을 계산한다. 따라서 실제 실시간으로 통행패턴이 바뀌는 도심의 교통상황에 대응하여 최적 신호전략을 수립할 수 있다. 다만 인접 교차로와의 신호 연동을 위해서 해당 교차로군의 주기길이는 동일하게 설정해야 한다는 한계점이 존재한다.

반면 3세대 신호시스템은 실시간으로 수집된 교통정보 데이터를 이용해 신호전략을 구축한다는 점에서 2세대 신호시스템과 유사하지만 주기마다 주기길이에 변화를 줄 수 있다는 점에서 차이가 있다. 일반적으로 실시간으로 변화하는 실제 교통상황에서 적정 신호 주기길이와 연동값(offset)을 동시에 만족하는 신호제어전략을 산출하는 것은 매우 어렵기 때문에(이영인 외, 2000), 교차로 간 연동성 보다 적정신호시간을 계산하는데 초점을 맞춰 주로 매주기별 평균지체, 대기열 길이 등을 최소화 하는 신호전략을 구사한다.

본 연구의 주요 주제인 주기변동(Cycle-free)기반 신호제어시스템은 매 주기별 수집된 교통정보를 활용해 주기별 주기길이, 신호시간, 연동값을 결정한다는 점에서 3세대 신호시스템으로 구분할 수 있다.



## 2. 선행 연구 고찰

### 1) 주기변동 신호제어모형

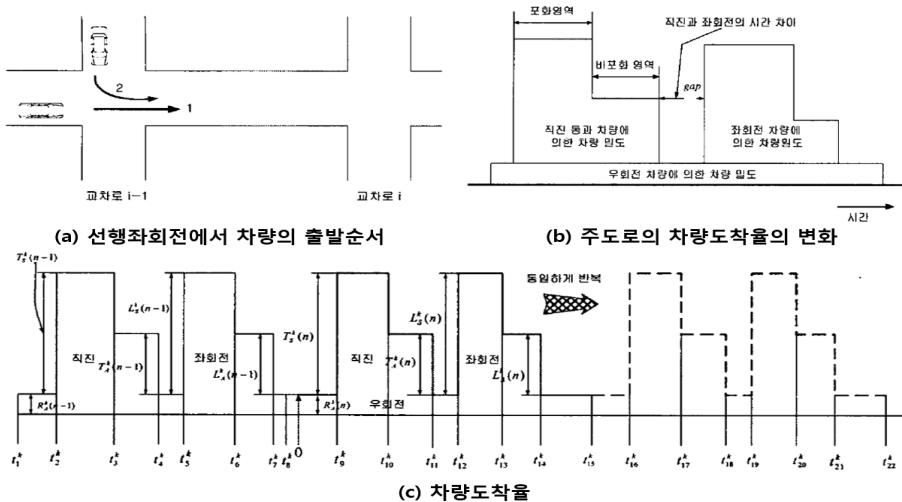
1960~70년대부터 점차 증가하는 승용차로 인해 대기오염 및 교통혼잡과 같은 여러 가지 사회문제들이 대두되면서, 이러한 고질적인 교통문제를 해결하기 위해 최적 신호제어와 관련된 다수의 연구들이 진행되었다. 특히 최근에는 도로에 설치된 차량검지기에서 수집한 실시간 교통자료와 휴리스틱 알고리즘을 이용하여 신호를 제어하는 실시간 신호제어 기법 연구들이 많이 진행되고 있다.

윤경섭(1998)은 차량 도착률 및 대기행렬 길이 자료를 이용해 대기차량을 최소화 하는 신호 연동 모델을 제시하였다. 일반적으로 신호 연동모델은 고정 주기 하에 평균 유입 교통량을 산출한 후 선형 최적화 이론을 통해 최적 신호를 산출한다. 하지만 해당 연구에서는 주기별 차량도착률을 이용해 대기 차량 길이를 예측하고 이를 통해 주기별 주기길이 및 현시신호시간을 최적화할 수 있는 거시적 모형을 제시하였다. 거시적 교통흐름 모델을 수식으로 표현하고 이를 선형프로그래밍 기법을 이용해 최적해를 찾았다는 점에서 시뮬레이션 분석모형을 주로 사용하는 요즘 연구들과 차이가 있다. 이때 거시적 교통흐름 모델은 Peytechev(1996)가 제안한 대기차량 예측모형을 이용하였다.

Park(1998)은 유전자 알고리즘과 중시적(Mesosopic) 교통시뮬레이터를 이용하여 신호시간 최적화 모형을 구축하였다. 중시적 시뮬레이터는 차량의 행태 및 차량 간 상호영향을 제대로 반영하는 미시적 시뮬레이터에 비해 현실성은 다소 떨어지지만 최적화시 계산속도가 빠르다는 장점이 있다. 최적화 변수로 이동류별 현시시간과 고정주기길이는 물론 연동값과 현시순서까지 다양하게 고려하였으며, 대기열 차단(Queue blocking)기법을 이용해 포화 교차로에서의 최적 신호시간 산출에 초점을 맞추었다는 특징이 있다. 특히 대기행렬이 길어져 상류교차로까지 넘

어 오는 Spillback 현상이 일어날 수 있는 포화 상태에서의 퍼포먼스 분석 및 민감도 분석 또한 이루어졌으며, 더 나아가 유전자 알고리즘에서 사용되는 파라미터 변화에 따른 민감도 분석도 이루어 졌다. 하지만 신호 연동에 대한 분석은 이루어지지 않았다는 점에서 한계가 있다.

이영인 외 2인(2000)은 시뮬레이션 모형이 아닌, 수식으로 나타낸 각 진입로의 대기차량 예측모형을 이용하여 다음 주기에서의 대기차량수를 예측하고 이를 통해 최적 신호시간을 산출하였다. 차량도착모형 구축을 위해 해당 연구에서는 각 접근로의 차량 도착률은 일정(Uniform)하다고 가정하였으며, 링크 이동시 차량밀도가 변하는 차량분산현상 또한 없는 것으로 가정하였다. 그 결과 각 교차로 진입로의 도착 차량수는 <그림 4>와 같이 신호주기길이 및 녹색시간에 따라 Unit Step함수<sup>2)</sup>의 합으로 정의하였다. 이는 선형부등식으로 최적 신호값을 쉽게 산출하기 위해서 차량 도착률을 균일하게 근사화한 것이지만 차량통행특성을 단순화시켜 모형화 하였다는 점에서 한계가 있다.



<그림 4> 차량도착분포 가정

출처 : 이영인 · 임재승 · 윤경섭(2000), “대기차량 최소화를 위한 주기변동기반 (Cycle-free based) 동적 신호시간 결정모형 개발”, 「대한교통학회지」, 18(2): 73-89.

2) 단위계단함수(Unit Step Function) : 0보다 작은 실수에 대해서는 0, 큰 실수에 대해서는 1인 함수.

또한 이 연구에서는 모든(8방향) 이동류의 대기차량 길이를 최소화시키는 최적신호시간 산출이외에도 특정 연동방향을 고려한 최적신호시간도 산출하였다. 특정 방향의 연동성을 고려하기 위해 목적함수 변수 중 특정 연동방향 이동류의 대기차량 길이에 가중치를 반영하였다. 모든 이동류의 대기차량 길이를 최소화시키는 목적함수와 연동성을 고려하기 위해 수정된 목적함수는 각각 식(2.4),(2.5)과 같다. 여기서 식(2.5)은 서->동방향의 연동성을 고려하여 서->동방향의 직진 이동류와 좌회전 이동류의 대기차량길이( $Q^2, Q^5$ )에 가중치를 둔 목적함수이다.

$$Min \sum_{k=1}^8 Q^k \quad \dots(2.4)$$

$$Min ((Q^2)^2 + (Q^5)^2) + ((Q^1 - Q_{ave})^2 + (Q^3 - Q_{ave})^2 + (Q^4 - Q_{ave})^2 \dots (2.5) \\ + (Q^6 - Q_{ave})^2 + (Q^7 - Q_{ave})^2 + (Q^8 - Q_{ave})^2)$$

여기서,  $Q^k$  : k 이동류의 녹색시간 종료 후 대기차량수(k=1~8)  
 $Q_{ave}$  : 8방향의 평균 대기차량수

이영인 외 2인(2001)은 기존 연구(이영인 외, 2000)에서 개발한 교차로 진입로별 차량도착모형을 이용하여 지체도를 최소화하는 주기변동기반 동적신호 결정모형을 개발하였다. 시뮬레이션 분석 대신 수식으로 표현한 차량도착모형을 이용하여 매 주기별 지체시간을 최소화(식(2.6))하는 신호주기길이와 이동류별 녹색시간을 산출하였다. 대기행렬길이를 최소화하는 최적신호시간을 산출하였던 기존연구와는 달리 교차로의 평균 지체도를 최소화하는 신호시간을 산출하였다는 점과 선형 최적화 기법이 아닌 유전자 알고리즘을 이용하여 최적해를 도출하였다는 점에서 차이가 있다. 여기서 지체도는 HCM(1994)에서 제시한 지체도 산정식을 사용하였으나 균일도착과 차량분산이 없는 것으로 가정하였기에 임의지체를 제외한 균일지체만 고려하였다. 4개 교차로로 이루어진 네트워크에 제시된 방법론을 적용한 결과, 기존의 정주기식 신호제어기법보다 지체시간에

있어 더 좋은 결과를 보여주는 것을 확인하였다. 또한 식(2.7)과 같이 신호 연동하려는 특정 이동류(직전(2번), 좌회전(5번) 이동류)의 지체도 최소화로 목적함수를 구성함으로써 특정방향의 연동성을 고려할 수 있는 모형도 제시하였다. 하지만 이는 교차로 간 신호 연동값(녹색신호 간격) 제어를 사용하는 것이 아니라 특정 연동방향의 녹색신호시간을 늘려주면서 지체를 줄이는 것이므로 진정한 의미의 신호 연동효과라고 하는 데에는 한계가 있다.

$$Min \frac{\sum_{i=1}^8 D_i}{\sum_{i=1}^8 V_i} \quad \dots(2.6)$$

$$Min \frac{D_2 V_2 + D_5 V_5}{V_2 + V_5} \quad \dots(2.7)$$

여기서,  $D_i$  : i 이동류의 지체시간(s)  
 $V_i$  : i 이동류의 교통량(대/주기)

최완석 외 1인(2002)은 대기차량길이와 평균지체도를 동시에 최소화하는 신호시간 결정모형을 개발하였다. 교차로 진입로의 차량도착모형을 균일분포로 가정한 Unit Step함수로 나타내어 분석하였으며, 지체도 역시 임의지체를 제외한 균일지체만 고려하였다는 점에서는 기존 연구들과 궤를 같이 한다. 하지만 파레토 최적해 기법을 유전자 알고리즘에 적용한 Goldberg(1989)의 파레토 유전 알고리즘(PGA)을 이용하여 이중목적 최적신호시간을 산출하였다는 점에서 기존 연구들과 차이가 있다. 4개의 교차로에 대해서 본 방법을 적용시킨 결과, 기존의 신호 최적화 프로그램인 PASSER-II 및 TRANSYT-7F의 최적신호제어 전략보다 대기차량 수 및 지체도에 있어 더 좋은 결과를 나타내었다. 또한 목적함수 구성에 있어 연동성과 관련된 변수를 별도로 고려하지 않고도 연동값(offset)이 조정된다는 것을 확인할 수 있었다고 언급하고 있다.

임현철(2005)은 대기행렬길이를 최소화하는 주기변동기반 신호시간 결정모형을 개발하고 기존의 정주기식 신호제어기법과 비교 평가하였다. 4개의 교차로를 대상으로 비교분석한 결과 TRANSYT-7F를 이용하여 최적화한 기존의 정주기식 신호제어기법 보다 운영효율이 좋은 것으로 나타났다. 신호최적화시 유전자 알고리즘을 사용하였다는 점에서 기존 연구들과 유사하지만 TRANSYT-7F의 차량군 분산모형(Roberson Model)을 이용한 교통류 모형을 사용하였다는 측면에서 차이가 있다. 이로써 링크 이동시 차량밀도가 일정하게 유지된다는 기존 연구들의 가정을 완화시켜 현실을 더 잘 반영한 신호시간을 산출할 수 있다는 점에 의의가 있다고 할 수 있다.

Srinivasan, D. et al.(2006)은 퍼지 신경망 이론(NN:Fuzzy neural network)에 동시 교란 확률 근사화(PSA:Simultaneous perturbation stochastic approximation) 기법<sup>3)</sup>을 적용한 PSA-NN모델과 다중 에이전트 시스템(Multiagent system) 기반의 Hybrid-NN모델을 이용해 실시간 신호제어 모형을 구축하고 싱가포르에서 현재 운영 중인 신호제어 알고리즘 Green Link Determining(GLIDE)과 비교 분석하였다. 그 결과 Hybrid-NN모델은 PSA-NN모델 및 기존의 신호제어모델보다 향상된 퍼포먼스를 보여주는 것으로 분석되었다. 기존의 신호제어모형 대비 평균지체 및 정지시간은 각각 78%, 85% 정도 감소한 것으로 분석되었다. 이 연구는 퍼지 신경망 이론과 유전자 알고리즘을 조합한 복합모형을 사용하여 단일 모형이 갖는 단점을 보완한다면, 기존 모형에 비해 대규모 네트워크에서 더욱 효율적인 신호제어가 가능함을 보여주었다.

한여희 외 1인(2012)는 지체시간과 연동성 두 가지 척도를 동시에 고려하는 신호교차로 거시적 시뮬레이션 모형을 개발하였다. 두 가지 척도를 동시에 고려하기 위해서 Daganzo(1994, 1995)의 Cell Transmission

---

3) SPSA(Simultaneous perturbation stochastic approximation)기법은 확률 근사화 알고리즘 중 하나으로써 알려지지 않은 다수의 파라미터를 가진 모형을 최적화 할 때 사용되는 알고리즘이다. Srinivasan, D. et al.(2006)에서는 신경망 모형에서 가중치를 업데이트하는 데에 사용되었다.

Model을 차용하여 각 셀의 밀도를 통해 지체도와 연동지표를 개발하고 이를 시뮬레이션 모형에 반영하였다. 해당 모형에서 연동지표는 교차로의 적색신호시간이나 차량 간 발생하는 충격과 모형을 이용해 산출하였다. 교차로에 대기차량이 있는 경우 상류교차로에서 출발한 차량들은 대기차량에 의해 일정 대기시간을 필요로 하며, 상류교차로에서 출발한 선두차량의 대기시간과 후미차량의 대기시간 간에는 차이가 발생하게 되는데, 대기시간의 차이가 짧을수록 연동성이 좋다고 가정하고 앞에서 설명한 셀 밀도를 이용해 연동지표로 표현하였다. 이렇게 정의한 지체도와 연동지표를 이용해 구축한 거시적 시뮬레이션 모형과 기존의 지체모형 및 연동모형의 효과척도를 비교 분석한 결과, 기존 신호최적화 모형에서 산출한 지체시간과 비교하여 유사한 패턴을 나타내는 것을 확인하였다.

## 2) 신호교차로 대기행렬 예측

신호 연동을 위해 연동값(offset)을 산출하기 위해서는 신호교차로의 대기행렬 길이 예측이 무엇보다 중요하다. 지금까지 신호교차로의 대기행렬 길이 예측과 관련하여 많은 연구들이 진행되었으며, 최근에는 휴리스틱 알고리즘을 이용한 대기행렬 예측 연구들이 진행되고 있다.

Peytechev et al.(1996)은 최적신호시간을 산출하는데 필요한 거시적 교통흐름 예측모형을 제시하였다. 해당 연구는 크게 두 개의 파트로 구성되어있는데 첫 번째는 교통류의 밀도와 대기행렬길이를 예측하는 모형을 구축하는 것이고 다른 하나는 회전 이동류의 계수를 실시간으로 측정하는 것이다. 그 중 Peytechev가 제안한 대기차량 예측모형을 살펴보면, 대기행렬의 상황을 크게 3가지로 구분하고, 각 상황에 따른 대기행렬 길이를 예측한다. 첫 번째는 녹색시간이 충분하지 못하여 대기하고 있는 차량들이 교차로를 모두 빠져나가지 못할 경우이다. 이때 특정링크  $i$ 의 다음 주기( $c+1$ ) 녹색신호 점등 시( $t_{c+1}^i$ ), 기대되는 대기차량수  $q_i(t_{c+1}^i)$ 는 아래의 식(2.8)과 같이 계산한다.

$$q_i(t_{c+1}^i) = q_i(t_c^i) + Q_{i,c+1} - N_{i,c+1} \quad \dots(2.8)$$

여기서,  $t_c^i$  : 링크 i의 현 주기(c) 녹색시간 시작시점

$t_{c+1}^i$  : 링크 i의 다음 주기(c+1) 녹색시간 시작시점

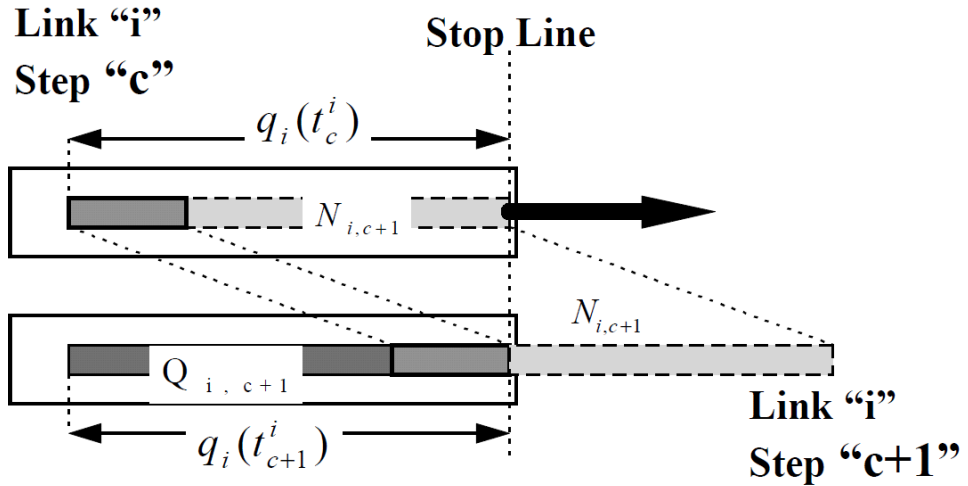
$q_i(t_{c+1}^i)$  :  $t_{c+1}$ 에서의 대기차량수

$q_i(t_c^i)$  :  $t_c$ 에서의 대기차량수

$Q_{i,c+1}$  : 현 주기(c)와 다음 주기(c+1) 사이에

$q_i(t_c^i)$ 에 추가되는 차량수

$N_{i,c+1}$  : 다음 주기 녹색시간동안 빠져나간 차량수



<그림 5> 대기행렬 상황 1

출처 : Peytechev et al.(1996), "A predictive macroscopic city traffic simulation model", Proc. ESS'96, Genoa, pp.38-42

두 번째는 대기차량수가 작아 녹색 신호 시간동안 대기차량은 모두 빠져나갈 수 있으나, 녹색시간동안 추가적으로 진입하는 차량은 모두 빠져나가지 못하는 경우이다. 이 경우 예측 대기차량수는 식(2.9)과 같이 산출한다.

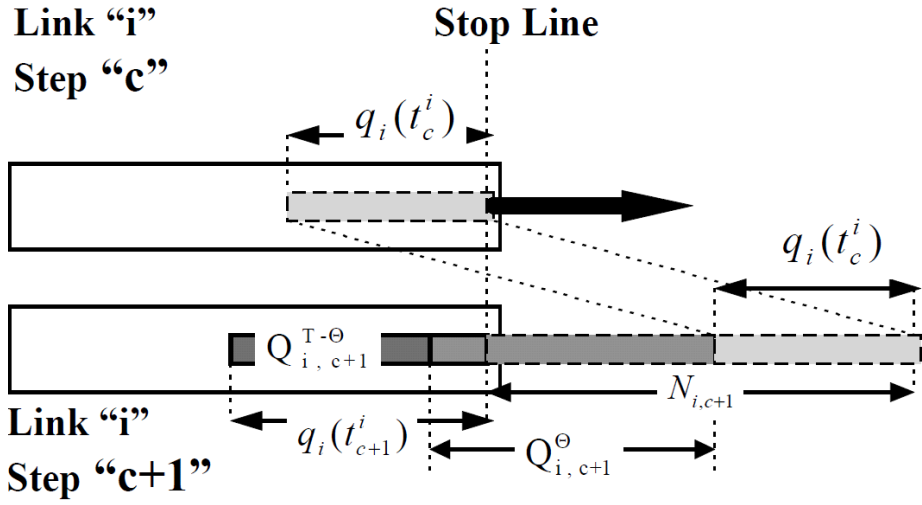
$$q_i(t_{c+1}^i) = [Q_{i,c+1}^g - (N_{i,c+1} - q_i(t_c^i))] + Q_{i,c+1}^{T-g} \quad \dots(2.9)$$

여기서,  $g$  : 녹색시간

$T$  : 주기길이(s)

$Q_{i,c+1}^g$  : 녹색시간에 대기행렬에 추가되는 차량수

$Q_{i,c+1}^{T-g}$  : 적색시간에 대기행렬에 추가되는 차량수



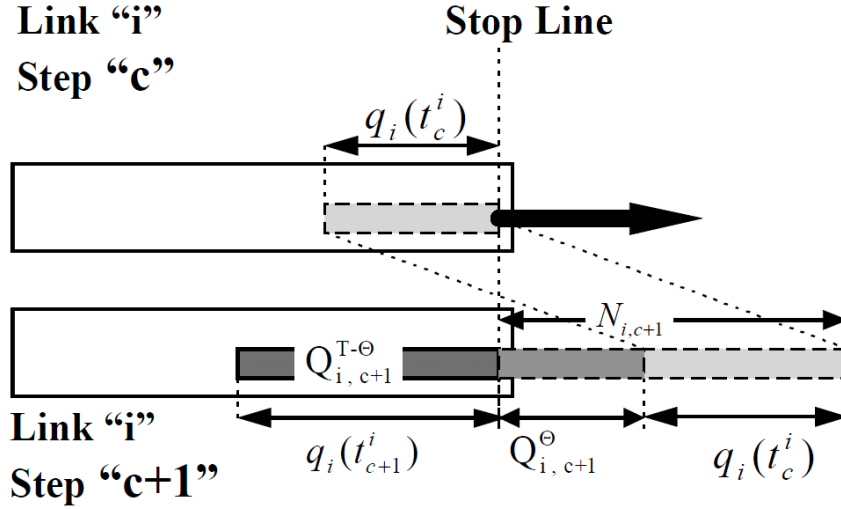
<그림 6> 대기행렬 상황 2

출처 : Peytechev et al.(1996), "A predictive macroscopic city traffic simulation model",  
Proc. ESS'96, Genoa, pp.38-42

세 번째는 대기차량수가 작아 녹색 신호 시간동안 대기차량이 모두 빠져나갈 수 있으며, 녹색 신호 시간에 진입하는 차량 역시 대기 행렬을 형성하지 않고 모두 빠져나갈 수 있는 경우이다. 이 경우 녹색신호 시간에 진입하는 차량수( $N_{i,c+1}$ )는  $q_i(t_c^i) + Q_{i,c+1}^g$ 가 되어, 이를 식(2.9)에 적용하면 식(2.10)을 얻을 수 있다.

$$q_i(t_{c+1}^i) = Q_{i,c+1}^{T-g} \quad \dots(2.10)$$





<그림 7> 대기행렬 상황 3

출처 : Peytechev et al.(1996), "A predictive macroscopic city traffic simulation model",  
Proc. ESS'96, Genoa, pp.38-42

이상 3가지 경우에 따른 식(2.8), (2.9), (2.10)을 하나의 식으로 일반화 해보면 식(2.11)으로 정리 할 수 있다.

$$q_i(t_{c+1}^i) = Q_{i,c+1}^{T-g} + \max[q_i(t_c^i) + Q_{i,c+1}^g - d_i g_{i,c+1}, 0] \quad \dots(2.11)$$

여기서,  $d_i$  : 녹색시간동안 처리되는 시간당 차량수 (대/초)

$g_{i,c+1}$  : 다음 주기( $c+1$ )의 녹색시간

심소정 외 2인(2002)은 칼만 필터를 이용하여 대기행렬 길이를 예측하는 모형을 제시하였다. 칼만 필터는 특정 시점에서의 상태와 이전 시점의 상태가 선형적인 관계를 가지고 있으며 이때 측정값은 확률적인 오차가 포함되어 있다는 가정 하에 측정오차를 고려한 선형 역학계의 상태를 추적하는 기법이다. 이 기법을 이용하여 서울 도심부의 남산1호 터널의 5분 후 대기행렬 길이를 예측한 결과, 유의수준 5% 내에서 실측치과 유사한 예측값을 얻을 수 있었다.

기병국 외 2인(2002)은 신경망 이론과 유전자 알고리즘을 결합하여 신호교차로의 대기행렬 예측 모형을 개발하였다. 지역해에 쉽게 수렴할 수 있는 신경망 모형의 단점을 극복하기 위해서 유전자 알고리즘을 결합한 하이브리드 형태의 모형을 제시하였다. 유전자 알고리즘에는 돌연변이 연산자가 존재하여 지역해에서 벗어나 전역해를 찾는 데 도움을 줄 수 있다. 이 결합모형을 사용하여 대기행렬을 예측한 결과, 신경망 모형 대비하여 학습시간 단축 및 예측오차 감소를 확인하였다.

지금까지 살펴본바와 같이 대기행렬예측 기법으로는 Peytechev가 제시한 간단한 수리적 모형에서부터 통계적 기법을 활용한 칼만 필터 및 휴리스틱 알고리즘을 이용한 신경망&유전자 알고리즘 기법 등 다양한 기법들이 활용되고 있음을 확인 할 수 있었다.

이러한 모형 중 칼만 필터 및 휴리스틱 알고리즘을 이용한 모형들은 교차로 간 신호전략이 고정신호로 운영된다고 가정하기 때문에 교차로의 유출교통량은 일정하고, 그 결과 특정시점과 이전시점의 대기행렬 차량수는 선형성을 띠거나 시간흐름에 따라 일정 패턴을 가진다. 따라서 데이터의 선형성을 가정하는 해당 알고리즘을 적용하여 대기행렬 차량수를 예측할 수 있다.

하지만 본 연구에서는 매주기마다 주기시간 및 방향별 녹색시간이 교통량 혹은 대기행렬 길이에 따라 변하는 주기변동 신호제어모형을 다루기 때문에 특정시점(현 주기)과 이전시점(이전 주기)에서의 대기행렬 길이는 일정한 패턴을 가지기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 Peytechev와 같이 현재 대기행렬 길이와 예상되는 다음 주기 주기시간 및 녹색시간 정보 등을 활용하여 수식으로 나타낸 수리적 모형 기반 대기행렬 예측모형이 보다 적합할 것으로 추정된다.

### 3) 본 연구의 차별성

신호 연동을 고려하기 위해서는 주기길이 및 현시길이 결정시 교차로 간 녹색시작시점 차이값인 연동값(offset)을 우선적으로 고려해야 한다. 하지만 지금까지 살펴본 주기변동기반 신호최적화는 대부분 신호 연동값을 고려하지 않은 채, 실시간 교통상황정보만을 이용하여 각 교차로별 효율적으로 신호 제어할 수 있는 방법에 초점을 맞추고 있다. 이는 일반적으로 다음 주기의 교차로 유입교통량과 교차로 간 대기행렬길이를 예측하는 데 많은 어려움이 있기 때문에, 교차로 간 신호 연동보다 각 교차로별 독립적 효율성에 초점을 맞추는 주기변동기반 신호제어시스템의 특성을 반영하기 위함인 것으로 추정된다.

이러한 시스템의 특성에도 불구하고 신호 연동은 여전히 중요하기 때문에 일부 선행연구에서는 주기변동 신호제어모형에 신호 연동을 고려할 수 있는 방법들을 제시하고 있다. 하지만 이러한 연구들은 몇 가지 한계점이 존재한다. 전술한 바와 같이 신호 연동을 위해서는 연동값을 고려해야 하며, 이 연동값을 산정하기 위해서는 무엇보다 교차로 간 대기행렬 예측이 필요하다. 하지만, 현실에서는 예측할 수 없는 다양한 변수로 인해 정확한 대기행렬 길이를 예측하기 어렵다.

지금까지 살펴본 주기변동기반 신호제어모형과 관련된 선행연구들은 중/거시적 시뮬레이션 분석의 한계점인, 현실세계의 임의성 배제로 인해, 교차로의 차량 도착확률을 균일 분포함수로 가정하는 등 실시간으로 변화하는 교통류 상황을 제대로 고려하고 있지 않다. 그 결과, 현 주기의 통과교통량 및 대기행렬 예측 시, 현실에서의 예외상황을 무시한 채로 이상적인 상황에서의 정확한 교통량 및 대기행렬 길이를 예측할 수 있게 되고, 결과적으로 현실과는 다르게 지체도와 연동효율이 다소 과도하게 산출되어 질 수 있는 여지가 있다.

현실에서는 현 주기의 정확한 교통상황 정보를 얻기 힘들다. 일례로

적정 차로 진입 실패<sup>4)</sup>와 같이 차량 간 발생할 수 있는 다양한 상호작용 효과로 인해 해당주기의 교통량 및 접근로별 대기행렬길이를 정확히 예측하기 어렵다. 따라서 이러한 예외상황들을 고려하지 않은 채 해당 방법론을 교통량 예측에 많은 어려움이 따르는 실무에 적용한다면 큰 오차를 발생할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 다양한 차량행태를 표현할 수 있는 1. 미시적 교통시뮬레이터를 이용하여 현실의 임의성을 최대한 반영하고, 현실세계와 같은 동적인 교통상황 속에서 2. 대기행렬 길이 예측시의 오차를 최소화할 수 있는 방법을 검토하여 현실적 제약을 극복하고 연동효율을 향상시킬 수 있는 방법을 개발한다. 또한 이렇게 예측한 대기행렬 길이를 통해 산정한 3. 신호 연동값(offset)을 기존의 주기변동기반 신호제어 방법론에 직접적으로 반영할 수 있는 방법론을 개발한다는 점에서 선행 연구들과 차이가 있다.

<표 2> 본 연구의 차별성

구분	선행연구	본 연구
교통시뮬레이터	거시적/중시적 시뮬레이터 사용 ⇒차량행태 모사의 한계 존재	미시적 시뮬레이터 사용 ⇒다양한 차량행태 구현 가능
유입교통량	Uniform 분포 기반	임의분포(Poisson)
목적함수 (지체시간)	균일지체+ $\alpha$ 고려	균일지체+증분지체+추가지체
신호 연동성	제한적 고려 (특정 연동방향의 녹색현시시간 늘려 연동성 향상)	우선적 고려 (신호교차로 간 연동값(offset)을 고려하여 연동성 향상)

4) 좌회전 차량이 좌회전 차선으로 진입하지 못한 채 직진차선을 점유하여 직진 이동류의 통행을 방해하는 상황.



### III. 신호 연동을 고려한 주기변동 신호제어 방법론

#### 1. 신호 연동을 고려한 주기변동 신호제어 방법론 구축

기존의 신호제어방법론에서는 교차로별로 신호주기 종료 시마다 방향별 교통량 정보를 이용하여 주기길이 및 신호시간을 동시에 최적화한다. 하지만 본 연구에서 제안하는 방법론은 기준이 되는 중요교차로(CI : Critical Intersection)에서만 주기길이와 신호시간을 동시에 최적화하고, 나머지 연동되는 교차로들은 중요교차로에서 결정된 주기길이에 교차로 간 연동값(offset)을 고려하여 주기길이를 결정하고 그 후 신호시간만 최적화 알고리즘을 이용하여 산출한다. 이로써 각 교차로별 주기시간을 독립적으로 최적할 수 없다는 단점이 존재하지만 교차로 간 신호 연동을 우선적으로 고려하면서 교차로별 최적화된 현시시간을 결정할 수 있다는 장점이 있다. 또한 신호 연동을 위한 연동값 산정 시 다음 주기의 대기 차량수를 예측하고 이를 이용하여 교차로 간 연동값을 산출하는데, 현실에서 나타날 수 있는 여러 예측오차로 인한 연동효과 감소를 최소화하기 위해 예측이후 측정된 관측값과의 오차정보를 이용하여 연동값을 실시간 보정한다. 따라서 대기행렬 예측으로 인한 오차를 최소화하여 연동성을 향상시킬 수 있다.

네트워크가 아래의 그림과 같이 두 개의 교차로로 이루어져 있으며, 교차로1이 중요교차로(CI)이고 서->동 방향의 주도로 신호 연동을 고려한다고 할 때, 본 연구에서 제시하는 방법론은 시간 흐름(교차로별 신호 주기 시작순서)에 따라 다음과 같이 단계별로 나누어 설명할 수 있다.



<그림 8> 예시 교차로

1)  $t = t_1$  (교차로1의 첫 번째 신호 주기 시작시점)

Step1. 교차로1(CI)의 주기길이 및 현시시간 결정

먼저 신호 연동하려는 교차로 중 중요교차로(CI)를 첫 번째 연동 교차로로 설정하고, 유전자 알고리즘을 이용하여 목적함수(지체시간)를 최소화하는 주기길이와 현시시간을 산출한다. 여기서 주기길이와 신호시간을 최적화하는 알고리즘에 대한 자세한 내용은 3장 2절을 참고한다.

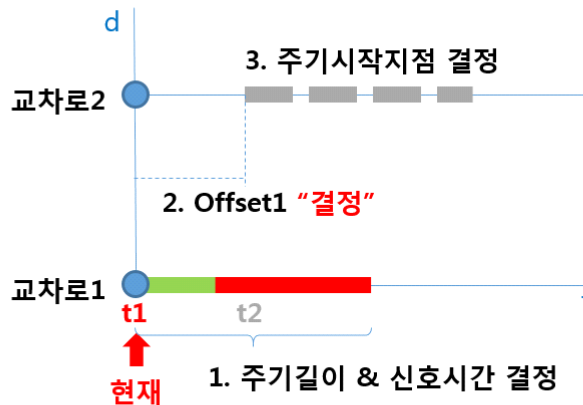
Step2. 첫 번째 주기의 연동값( $offset_1$ ) 결정

도로에 설치된 차량검지기를 이용하여 현재( $t_1$ ) 교차로1-교차로2간 대기행렬 길이를 측정하고 첫 번째 주기의 연동값( $offset_1$ )을 산정한다. 연동값 산정방법과 관련된 자세한 내용은 3장 3절을 참고한다.

Step3. 교차로2의 주기 시작시점 결정

$t_1$ 에 Step2에서 산정한  $offset_1$ 을 더해 교차로2의 첫 번째 주기 시작시점( $t_2$ )을 산정한다.

$$t_2 = t_1 + offset_1 \quad \dots(3.1)$$



<그림 9> 교차로1 첫 번째 주기 시작시점( $t_1$ )의 작업순서

## 2) $t = t_2$ (교차로2의 첫 번째 신호 주기 시작시점)

### Step1. 두 번째 주기의 연동값( $offset_2$ ) 예측

$t_1$ 과 동일하게  $t_2$ 에서는 교차로2의 주기길이와 현시시간을 산출해야 한다. 하지만  $t_1$ 과는 다르게 두 번째 연동 교차로의 주기길이는 이전 교차로(교차로1)의 주기길이에 교차로 간 연동값(offset)을 고려하여 결정한다.

따라서 본 단계에서는 교차로2의 주기 길이를 산정하기 위해 <그림 10>과 같이 교차로1의 첫 번째 주기가 끝나는 시점( $t_3$ )에서의 연동값( $offset_2$ )을 먼저 ‘예측’해야 한다. 연동값은 교차로 간 대기행렬길이를 이용하여 산정하기 때문에 교차로1의 첫 번째 주기가 끝나는 시점( $t_3$ )에서의 대기차량수를 추정하고 이 값을 연동값 산정식에 대입하여  $offset_2$ 을 계산한다. 이때 교차로1의 첫 번째 주기가 끝나는 시점( $t_3$ )에서의 대기차량수를 구하는 방법은 아래의 식과 같이 개략적으로 나타낼 수 있으며, 이에 대한 자세한 내용은 3장 3절을 참고한다.

$$Q_{t3} = Q_{t2} + I_{n_{straight}} - Out + I_{n_{right}} + I_{n_{left}} \quad \dots(3.2)$$

여기서,  $Q_t$  :  $t$ 에서의 대기차량수(대)

$I_{n_{straight}}$  : 상류교차로에서 직진으로 진입하는 차량수(대/주기)

$I_{n_{right}}, I_{n_{left}}$  : 우/좌회전을 통해 진입하는 차량수(대/주기)

$Out$  : 현교차로의 평균처리차량수(대/주기)

### Step2. 교차로2의 주기길이 및 다음 주기 시작시점 결정

교차로1의 첫 번째 주기가 끝나는 시점( $t_3$ )에 Step1에서 산정한  $offset_2$ 을 더해 교차로2의 두 번째 주기 시작시점( $t_4$ )을 산정한다.  $t_4$ 를 결정함으로써 교차로2의 첫 번째 주기길이는 자동적으로 계산된다.



교차로2의 첫 번째 주기길이( $Cycle_{2,1}$ )는 아래의 식과 같이  $offset_2$ 을 이용하여 산정할 수 있다.

$$Cycle_{2,1} = (t_3 + offset_2) - t_2 \quad \dots(3.3)$$

여기서,  $Cycle_{2,1}$  : 교차로2의 첫 번째 주기길이(s)

$offset_2$  : 두 번째 주기의 연동값

### Step3. 교차로2의 현시시간 결정

이전 단계에서는 교차로2의 주기길이를 결정하였다면 본 단계에서는 교차로2의 현시시간을 결정한다. 여기서 현시시간은 유전자 알고리즘을 이용하여 목적함수(지체시간)를 최소화하는 값으로 산출한다. 교차로 1(CI)과는 달리 주기길이는 이전 단계에서 연동값을 고려하여 이미 산정하였기 때문에 본 단계에서는 신호 현시시간만을 최적화한다는 것에서 차이가 있다. 이는 유전자 알고리즘의 목적함수 중 주기변수  $C$ 를 상수(주어진 값)로 처리함으로써 해결할 수 있다. 최적화 알고리즘에 대한 자세한 내용은 3장 2절을 참고한다.



<그림 10> 교차로2 첫 번째 주기 시작시점( $t_2$ )의 작업순서

### 3) $t = t_3$ (교차로1의 두 번째 신호 주기 시작시점)

#### Step1. 교차로1(CI)의 주기길이 및 현시시간 결정

$t_1$ 과 같이 유전자 알고리즘을 이용하여 목적함수를 최소화하는 교차로1(CI)의 주기길이와 현시시간을 산출한다. 여기서 주기길이와 신호시간을 최적화하는 유전자 알고리즘의 자세한 내용은 3장 2절을 참고한다.

#### Step2. 두 번째 주기의 연동값( $offset_2$ ) 갱신

교차로2의 주기길이를 결정하기 위해 전 단계( $t_2$ 의 Step1)에서 산정한  $offset_2$ 는 예측 대기행렬길이를 이용하여 산정한 ‘예측’값이므로 현 단계( $t_3$ )에서의 실제 대기차량수를 측정하여  $offset_2$ 을 최종 갱신한다.

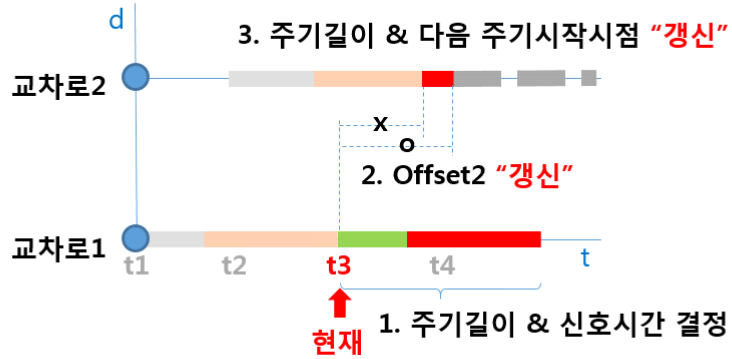
이렇게 하는 이유는 예측 대기행렬길이와 실측 대기행렬길이에 차이가 발생할 경우, 교차로 간 신호 연동이 어긋나 연동 효과가 크게 감소하는 것을 방지하기 위함이다.

#### Step3. 교차로2의 주기길이 및 다음 주기 시작시점 갱신

전술한 바와 같이  $offset_2$  갱신값과 예측값이 차이가 난다면 연동 효과가 크게 감소되어 이를 적절하게 보정해줄 수 있는 방법이 필요하다.

Step2에서 산정한  $offset_2$  갱신값이 이전 예측값보다 큰 경우, 그 차이만큼 교차로2의 마지막 현시길이 및 주기길이를 늘려줄 수 있다. 만약 차이가 한 현시에 더하기 부담스러울 정도로 큰 경우(ex. 5초 이상일 때)에는 차이를 n등분하여 교차로2의 남은 현시들의 길이를 늘이거나, 상황에 따라 전략적으로 배분할 수 있다. 반대로  $offset_2$  갱신값이 예측값보다 작은 경우에는 상황에 따라 마지막 현시길이만 줄여 주거나, 차이를 n등분하여 남은 현시길이를 줄여줄 수 있다. 만약 차이가 상대적으로 클 경우에는 예측  $offset_2$  값을 그대로 유지할 수도 있다.

교차로2의 두 번째 주기 시작시점( $t_4$ )은 현재시점( $t_3$ )에서 갱신된  $offset_2$ 를 더해 최종 갱신한다.



<그림 11> 교차로1 두 번째 주기 시작시점( $t_3$ )의 작업순서

4)  $t = t_4$  (교차로2의 두 번째 신호 주기 시작시점)

Step1. 세 번째 주기의 연동값( $offset_3$ ) 예측

교차로2의 주기 길이를 산정하기 위해 <그림 12>와 같이 교차로1의 두 번째 주기가 끝나는 시점( $t_5$ )에서의 연동값( $offset_3$ )을 먼저 ‘예측’한다. 연동값( $offset_3$ )을 산정하기 위해 교차로1의 두 번째 주기가 끝나는 시점( $t_5$ )에서의 대기차량수를 추정하고 이 값을 연동값 산정식에 대입하여  $offset_3$ 을 구한다. 이때  $t_5$ 에서의 대기차량수를 산정하는 방법은 아래의 식과 같이 개략적으로 나타낼 수 있으며, 자세한 내용은 3장 3절을 참고한다.

$$Q_{t5} = Q_{t4} + In_{straight} - Out + In_{right} + In_{left} \quad \dots(3.4)$$

여기서,  $Q_t$  :  $t$ 에서의 대기차량수(대)

$In_{straight}$  : 상류교차로에서 직진으로 진입하는 차량수(대/주기)

$In_{right}, In_{left}$  : 우/좌회전을 통해 진입하는 차량수(대/주기)

$Out$  : 현교차로의 평균처리차량수(대/주기)

## Step2. 교차로2의 주기길이 및 다음 주기 시작시점 결정

교차로1의 두 번째 주기가 끝나는 시점( $t_5$ )에 Step1에서 산정한  $offset_3$ 을 더해 교차로2의 세 번째 주기 시작시점( $t_6$ )을 산정한다.  $t_6$ 을 결정함으로써 교차로2의 두 번째 주기길이는 자동으로 결정된다. 교차로2의 두 번째 주기길이( $Cycle_{2,2}$ )는 식(3.5)과 같이  $offset_3$ 을 이용하여 산정한다.

$$Cycle_{2,2} = (t_5 + offset_3) - t_4 \quad \dots(3.5)$$

여기서,  $Cycle_{2,2}$  : 교차로2의 두 번째 주기길이(s)

$offset_3$  : 세 번째 주기의 연동값

## Step3. 교차로2의 현시시간 결정

유전자 알고리즘을 이용하여 목적함수(지체시간)를 최소화하는 교차로2의 현시시간을 산출한다. 단, 이전 단계에서 연동값을 고려해 주기길이를 이미 산정하였기 때문에 본 단계에서는 현시시간만을 최적화한다. 최적화 알고리즘에 대한 자세한 내용은 3장 2절을 참고한다.



<그림 12> 교차로2 첫 번째 주기 시작시점( $t_2$ )의 작업순서

## 2. 유전자 알고리즘을 이용한 주기길이 및 현시길이 최적화 모형

본 연구에서 제시한 방법론에서는 신호 주기시간 및 현시시간 최적화시 유전자 알고리즘을 사용한다. 유전자 알고리즘은 생물의 진화 과정을 기반으로 한 최적화 탐색방법으로 주어진 환경에 잘 적응하는 유전자만을 선택(selection)하여 교배(crossover)시키고 때에 따라서는 돌연변이(mutation)를 통해 다음 세대에 우수한 유전 형질을 전달(reproduction)시키는 알고리즘이다. 따라서 진화(evolution)가 거듭될수록 주어진 환경(목적함수)에 더 적합한 유전자(또는 解)들만이 남아있게 된다.

### 1) 유전자 구조

유전자 알고리즘을 적용하기 위해서는 <그림 13>과 같이 먼저 유전자 구조를 정의해야 한다. 본 연구에서는 독립변수인 주기시간 및 각 현시시간과 관련된 변수로 염색체(또는 개체)를 구성하였다. 다수의 유전자(변수)로 이루어진 개체를 정의할 때 개체를 어떻게 설계했는지에 따라 알고리즘 퍼포먼스에 상당한 영향을 미치기 때문에 개체구조 설계 시 효율성을 고려하여 설계해야 한다.

본 연구에서는 Park(1998)이 제시한 개체구조를 준용하였는데, Park(1998)이 제시한 염색체(Chromosome) 구조는 독립변수인 주기시간과 각 현시시간들을 변수로 직접 설정하지 않고, 제약조건(ex. 주기길이는 최저 주기길이보다 커야 한다)을 고려한 주기시간 ‘관련’변수와 현시시간 ‘관련’변수로 구성되어 있다. 이로 인해 주기시간 및 현시시간 관련 변수를 실제 주기시간 및 현시시간으로 변환(Decoding)해서 사용해야 하는 단점이 존재하지만 제약조건을 반영한 관련변수를 사용함으로써 제약조건 수가 줄어들어 결과적으로 유전자 알고리즘의 실행속도가 향상되는 효과를 가져다준다.

### 개체군 (n개의 개체로 구성)









- 개체1 :  $\{ v_1 ; v_2 ; v_3 ; v_4 ; v_5 ; v_6 \}$   
 $\{101101;111010;010010;111101;000010;100100\}$   
 $\vdots$   
 - 개체n :  $\{001001;100010;011110;100101;011010;001101\}$

여기서,  $v_1$  : 주기시간 관련 유전자(변수)  
 $v_2$  : 주도로(동서방향)의 총 녹색시간 관련 유전자  
 $v_3$  : 주도로의 현시 녹색시간인 G1, G2 관련 변수  
 $v_4$  : 부도로(남북방향)의 현시 녹색시간 G3, G4 관련 변수  
 $v_5$  : 주도로의 현시 녹색시간 G5, G6 관련 변수  
 $v_6$  : 부도로의 현시 녹색시간 G7, G8 관련 변수

<그림 13> 염색체(Chromosome) 구조

신호교차로의 현시순서는 <표 3>과 같이 NEMA의 Dual-Ring 체계를 따르는 것으로 가정한다. 만약 하나의 신호교차로를 고려할 때, 한 염색체(개체)를 이루고 있는 유전자 개수는 총 6개로 주기시간을 결정하는 유전자  $v_1$ , 주도로(동서방향)의 총 녹색시간을 결정하는 유전자  $v_2$ , 주도로의 현시 녹색시간인 G1, G2를 결정하는 유전자  $v_3$ , 부도로(남북방향)의 현시 녹색시간인 G3, G4를 결정하는 유전자  $v_4$ , 주도로의 현시 녹색시간인 G5, G6을 결정하는 유전자  $v_5$ , 부도로의 현시 녹색시간 G7, G8을 결정하는 유전자  $v_6$ 로 구성된다.

<표 3> 현시순서 및 현시번호 설정

주도로(동서방향)		부도로(남북방향)	
G2 	G1 	G4 	G3 
 G6	 G5	 G8	 G7

앞에서 설명한 것과 같이 2진수로 이루어진 각 유전자( $v_1 \sim v_6$ )는 독립 변수인 주기시간 및 현시시간을 직접적으로 나타내는 변수가 아닌 ‘관련’ 변수이기 때문에 식(3.6)과 같은 변환식을 이용하여 실제 주기시간과 각 현시시간으로 변환(Decoding)해야 한다.

변환과정은 다음과 같다. 먼저 2진수 값인 유전자( $v_i$ )는 식(3.7)을 이용하여 0~1사이의 10진수 소수값( $f_i$ )으로 전환한다. 그 후 다시 제약조건을 고려한 변환식(3.6)을 통해 우리가 실제 원하는 독립변수(주기길이 및 현시시간)로 변환한다. 예를 들어 주기길이의 경우, 최소 주기값( $MinC$ )보다 크고 최대 주기값( $MaxC$ )보다 작아야 하는 제약조건을 갖지만, 0~1사이의 백분율 주기길이 관련변수( $v_1$ )와  $MinC$ ,  $MaxC$ 값을 이용하여 변환식( $Cycle = MinC + (MaxC - MinC) \times v_1$ )을 구성하고 있기 때문에 주기길이 관련변수( $v_1$ )에 어떠한 값이 할당되어도 실제 주기길이는 최소 주기값과 최대 주기값 사이로 설정된다.

이렇듯 변환식(3.6)에서 각 변수들의 제약조건을 모두 고려하고 있기에 최적화 알고리즘 상에서는 ‘최소/최대 현시시간 조건’, ‘최소/최대 주기길이 조건’, ‘현시시간의 합=주기길이’ 등의 독립변수 간 관계를 나타내는 제약조건을 별도로 고려할 필요가 없다.

$$\begin{aligned}
 Cycle &= MinC + Int[(MaxC - MinC) \times v_1] & \dots(3.6) \\
 Green_{main} &= mp_1 + mp_2 + Int[(Cycle - MP) \times v_2] \\
 Green_{cross} &= mp_3 + mp_4 + Int[(Cycle - MP) \times (1 - v_2)] \\
 G_1 &= mp_1 + Int[(Cycle - MP) \times f_2 \times f_3] \\
 G_2 &= mp_2 + Int[(Cycle - MP) \times f_2 \times (1 - f_3)] \\
 G_3 &= mp_3 + Int[(Cycle - MP) \times (1 - f_2) \times f_5] \\
 G_4 &= mp_4 + Int[(Cycle - MP) \times (1 - f_2) \times (1 - f_5)] \\
 G_5 &= mp_5 + Int[(Cycle - MP) \times f_2 \times f_4] \\
 G_6 &= mp_6 + Int[(Cycle - MP) \times f_2 \times (1 - f_4)] \\
 G_7 &= mp_7 + Int[(Cycle - MP) \times (1 - f_2) \times f_6] \\
 G_8 &= mp_8 + Int[(Cycle - MP) \times (1 - f_2) \times (1 - f_6)]
 \end{aligned}$$

$$f_i = \frac{v_i \text{의 10진수 값}}{6\text{자리 이진수의 최대값}}, (0 \leq f_i \leq 1) \quad \dots(3.7)$$

여기서, *Cycle* : 신호 주기시간(s)

*MinC, MaxC* : 최소/최대 주기시간(s)

*G<sub>main</sub>* : 주도로(동서방향)의 총 녹색시간

*G<sub>cross</sub>* : 부도로(남북방향)의 총 녹색시간

*mp<sub>i</sub>* : 현시 *i*의 최소 녹색시간

*MP* :  $Max(mp_1 + mp_2 + mp_3 + mp_4, mp_5 + mp_6 + mp_7 + mp_8)$

*G<sub>i</sub>* : 현시 *i*의 녹색시간

*v<sub>i</sub>* : *i*번째 유전자 변수

## 2) 유전자 연산자

유전자 알고리즘은 크게 재생산(Reproduction), 교배(Crossover), 돌연변이(Mutation) 연산자로 이루어져 있다. 각각의 연산자별로 사용할 수 있는 연산자 알고리즘은 문제의 특성과 유전자 구조 성격에 따라 다양하게 존재한다. 본 연구에서 사용하고 있는 연산자 알고리즘은 다음과 같다.

### ① 재생산(Reproduction) 연산자

재생산 연산자는 적합도(목적함수 값)가 좋은 우성 개체에게 다음 세대에 더 많이 생산할 수 있는 기회를 주고 열성개체는 도태시켜 다음 세대에 전달되지 않게 하는 연산자이다. 본 연구에서는 개체군 중에서 일정한 개수(*k*)의 개체를 임의로 선택하고 그 중 최고의 적합도를 가지는 개체를 다음세대에 남기는 토너먼트 선택법을 사용하였다.

### ② 교배(Crossover) 연산자

교배 연산자는 두 개의 부모개체로부터 새로운 자식개체를 생성하는 유전자로 두 개체의 유전자 배열을 섞어 새로운 개체를 생성한다. 본 연



구에서는 2점 교배법을 이용하여 새로운 개체를 생산하였으며, 이때 교배확률은 25%로 설정하였다.

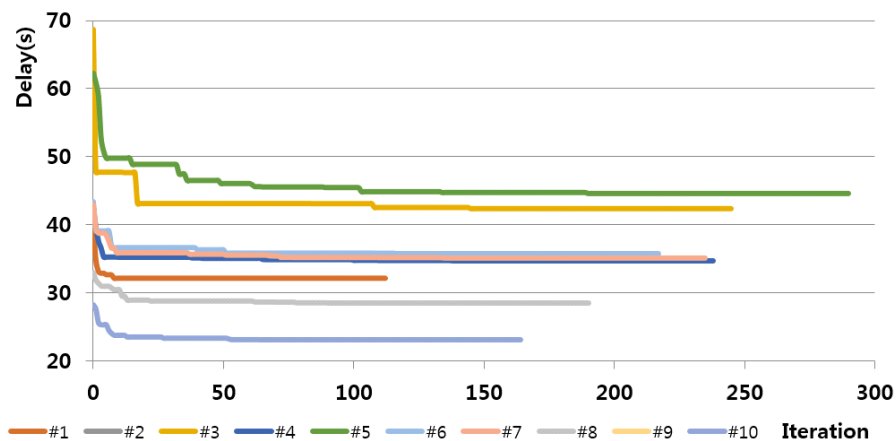
### ③ 돌연변이(Mutation) 연산자

돌연변이 연산자는 유전자 배열 중의 특정 유전자(gene)를 임의로 바꾸는 연산자로서 최적해 탐색 중 지역해(Local optimum)에서 수렴하는 것을 방지해 주는 역할을 한다. 본 연구에서는 돌연변이 확률을 1%로 설정하였다.

### ④ 종료조건

본 알고리즘의 적정 종료횟수를 설정하기 위해 접근로별 유입교통량이 약 1500대/시이며, 차선은 접근로별 직진 2차로와 좌회전 전용 1차로로 구성된 4지 교차로를 대상으로 신호 최적화를 수행하였다. <그림 14>는 반복횟수에 따른 적합도(지체시간) 수렴결과를 나타낸다. 최적화를 10번 반복 수행하였을 때 대부분 반복횟수 300번 이하에서 적합도가 수렴되었다. 또한 최적화하는데 소요되는 시간은 1초 미만이었다.

따라서 본 연구에서 종료조건은 최대 반복회수가 500회(세대)이거나 수렴횟수가 100회(세대)이상 일 때로 설정하였다.



<그림 14> 반복횟수에 따른 적합도(지체시간) 변화

### 3) 목적함수(적합도 함수)

본 방법론에서 사용하는 목적함수는 평균제어지체시간 최소화이다. 여기서 지체시간 산정식은 도로용량편람(2013)에서 제시하고 있는 지체시간 산정식을 준용하였다.

지체시간은 균일지체, 증분지체, 추가지체의 합으로 구성된다. 하지만 일반적인 거시적 시물레이션 분석에서는 임의성을 배제하고 차량 도착분포를 균일분포함수를 이용하기 때문에 지체시간을 산정하는 목적함수 구축 시 증분지체를 제외한 균일지체 및 초기 대기행렬에 따른 추가지체만 고려한다. 하지만 본 연구에서는 미시적 시물레이션 분석에 기반을 두기 때문에 도로용량편람에서 제시하는 네 가지 초기 대기차량의 길이 유형에 따라 균일지체, 증분지체, 추가지체를 다르게 산정할 수 있다. 각 유형별 지체시간 산정식은 다음과 같다.

① 유형 0 : 초기 대기차량( $Q_b$ ) 없을 때.

$$\begin{aligned} d &= d_1(PF) + d_2 & \dots(3.8) \\ d_1 &= \frac{0.5C(1-g/C)^2}{1 - [\min(1, X) \times g/C]} \\ d_2 &= 900T[(X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + 4X/cT}] \end{aligned}$$

여기서,  $d$  : 차량 당 평균제어지체(초/대)

$d_1$  : 균일지체(초/대)

$PF$  : 신호 연동에 의한 연동보정계수(=1)

$d_2$  : 증분지체(초/대)

$d_3$  : 추가지체(초/대)

$C$  : 주기(초)

$Q_b$  : 초기 대기차량수(대)

$g$  : 유효녹색시간(초)

$X$  : 포화도( $V/c$ )

$c$  : 용량(vph)

$R$  : 적색시간(초)

$y$  : 교통량비(=V/S)

$T$  : 분석시간 길이(시간)

$S$  : 포화교통량(vphg)

- ② 유형 1 : 초기 대기차량( $Q_b$ )이 존재하며, 분석기간 이내에 도착하는 모든 교통량을 처리하여 분석기간 이후에는 대기차량이 남지 않는 경우. 즉,  $0 < Q_b < (1-X)cT$  일 때.

$$\begin{aligned}
 d &= d_1(PF) + d_2 + d_3 & \cdots(3.9) \\
 d_1 &= \frac{R^2}{2C(1-y)} + \frac{Q_b R}{2TS(1-y)} \\
 d_2 &= 900T[(X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + 4X/cT}] \\
 d_3 &= \frac{1800Q_b^2}{cT(c-V)}
 \end{aligned}$$

- ③ 유형 2 : 초기 대기차량( $Q_b$ )이 존재하며, 분석기간 이후에도 여전히 대기차량이 남아 있으나 그 길이가 초기 대기행렬보다 줄어든 경우. 즉,  $0 < (1-X)cT < Q_b$  일 때.

$$\begin{aligned}
 d &= d_1(PF) + d_2 + d_3 & \cdots(3.10) \\
 d_1 &= \frac{R}{2} \\
 d_2 &= 900T[(X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + 4X/cT}] \\
 d_3 &= \frac{3600Q_b}{c} - 1800T(1-X)
 \end{aligned}$$

- ④ 유형 3 : 초기 대기차량( $Q_b$ )이 존재하며, 분석기간 이후에도 여전히 대기차량이 남아 있으나 그 길이가 초기 대기행렬보다 늘어난 경우. 즉,  $(1-X)cT < 0 < Q_b$  일 때.

$$\begin{aligned}
 d &= d_1(PF) + d_2 + d_3 & \cdots(3.11) \\
 d_1 &= \frac{R}{2} \\
 d_2 &= 900T[(X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + 4X/cT}] \\
 d_3 &= \frac{3600Q_b}{c}
 \end{aligned}$$

#### 4) 기초변수 산출

목적함수를 산출하기 위해서는 교통량 이외에도 포화도, 포화교통류율 등과 같은 기초변수를 필요로 한다. 본 연구에서 사용한 기초변수(포화도, 포화교통류율)를 산정하는 방법은 다음과 같다.

##### ① 포화도

포화도는 일반적으로 교통량과 용량의 비로 정의된다. 하지만 우리나라에서 사용하고 있는 실시간 신호제어시스템(COSMOS)에서는 포화도를 주어진 녹색시간과 실제 차량이 사용한 녹색시간의 비로서 표현한다. 아래의 식은 COSMOS에서 포화도를 산출하기 위해 사용하는 포화도 산정식으로서 도로에 설치된 차량검지기에서 측정된 비 점유 시간을 이용해 포화도를 산정한다. 본 연구에서는 COSMOS의 포화도 산정식을 준용하여 포화도를 계산하였다.

$$DS = \frac{G - \sum Space - N \times t}{G} \quad \dots(3.12)$$

여기서,  $DS$  : 포화도(Degree of Saturation)

$G$  : 유효녹색시간(실제 운영된 녹색시간+황색시간, sec)

$\sum Space$  : 비점유시간의 합(sec)

$N$  : 비점유시간의 수, 차량수(veh)

$t$  : 평균 포화 비 점유 시간(sec)

##### ② 포화교통류율

포화교통류율은 이상적인 조건하에서 도로가 1시간 동안 처리할 수 있는 최대 교통량이다. COSMOS에서는 도로 정지선에 설치된 직진 검지기로부터 포화차두시간을 실측하여 산출한다. 단, 포화차두시간 산정시 출발 후 6번째까지 차량은 제외하며 차두시간이 0.8~ 3.5초 범위 외의

값 역시 제외한다. 이렇게 구한 주기별 평균 포화차두시간은 다시 14주기 평균하여 최종 포화교통류율을 산정한다. 본 연구에서는 미시 교통시뮬레이터(VISSIM)에서 설정한 평균포화차두시간(2초)을 이용하여 최종적으로 1800대/시를 포화교통류율로 설정하였다.

$$Saturation\ Flow = \frac{3600}{time\ headway} \quad \dots(3.13)$$

### 3. 연동값(offset) 산정모형

연동값(offset)은 2장에서 살펴본 바와 같이 교차로 간 같은 진행방향 현시 시작시점의 차이를 말하는 것으로 이 값을 조정하여 상류 교차로에서 출발하는 차량이 해당 교차로를 지나갈 때 정지하지 않고 통과하도록 할 수 있다. 본 연구에서는 연동값 산정 시 대기행렬을 고려한 연동값 산정식(2.2)을 사용하였으며, 다음 주기의 대기행렬길이 예측은 다음과 같은 모형을 이용하여 산정하였다.

#### 1) 대기행렬 길이 예측

일반적으로 신호 연동에서 가장 중요한 요소는 대기차량수 예측이다. 하지만 본 방법론에서는 예측에 따른 오차를 최소화하기 위해, 대기행렬길이 예측값과 이후 측정된 실측값과 비교를 통해 얻은 오차정보를 활용해 실시간으로 현시시간 또는 연동값(offset)을 업데이트하기 때문에 대기행렬길이 예측의 중요도가 상대적으로 낮게 생각되어질 수 있다.

그러나 만약 오차가 상대적으로 커서 보정 허용범위를 넘어설 경우에는 오차만큼 현시시간을 모두 보정하지 못해 신호 연동성을 크게 저하시킬 수 있다. 따라서 본 방법론 역시 신호 연동 효과를 증대시키기 위해서는 무엇보다 대기행렬 예측모형의 정확성이 중요하다고 할 수 있다.

<그림 15>와 같이 본 방법론에서는 신호 연동을 고려하며 특정 교차로(교차로2)의 주기길이를 산정하기 위해, 상류교차로(교차로1) 주기 종료 시( $t^e$ ) 상류교차로와 하류교차로 사이의 대기행렬길이를 예측한다. 대기행렬길이 예측은 3장 1절(방법론 구축)에서 간단히 기술한 바와 같이 현재( $t^p$ ) 대기행렬길이( $Q_{t^p}$ )에 상류교차로의 남은 주기시간( $t^e - t^p$ )동안 대기행렬에 추가 진입하는 교통량( $In_{straight}, In_{right}, In_{left}$ )을 더하고 대기행렬에서 빠져나가는 교통량( $Out$ )을 제외함으로써 예측 대상시점( $t^e$ )에서의 대기행렬길이를 예측할 수 있다.

$$Q_{t^e} = (Q_{t^p} + In_{straight} - Out) + In_{right} + In_{left} \quad \dots(3.14)$$

여기서,  $Q_t$  :  $t$ 에서의 대기차량수(대)

$In_{straight}$  : 상류교차로에서 직진으로 진입하는 차량수(대/주기)

$In_{right}, In_{left}$  : 우/좌회전을 통해 진입하는 차량수(대/주기)

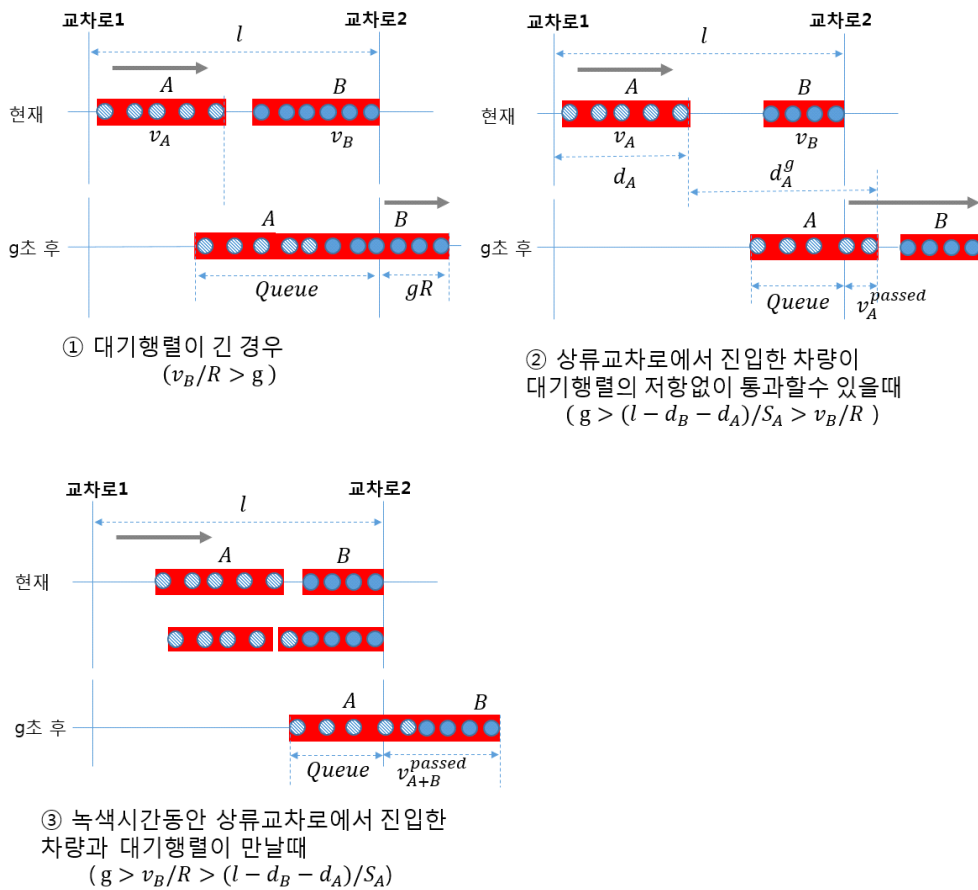
$Out$  : 하류교차로의 평균처리차량수(대/주기)



<그림 15> 대기행렬길이 예측 대상시점

하지만 한 주기길이(ex. 120초) 보다 작은 단시간 이후의 대기행렬길이를 예측해야하기 때문에 상류교차로와 하류교차로 사이의 교통류 밀집 유형 및 예측시의 교차로 현시상황에 따라 상류교차로의 남은 주기시간 동안 대기행렬에 진입하는 차량수( $In_{straight}, In_{right}, In_{left}$ )와 빠져나가는 차량수( $Out$ )에는 큰 차이가 발생할 수 있다.

일반적으로 상류교차로에서 우회전 또는 좌회전을 통해 하류교차로에 진입하는 통행량보다 상류교차로에서 직진을 통해 진입하는 통행량이 많다. 따라서 대기행렬을 예측할 때 상류교차로에서 진입하는 차량을 중심으로 고려하면, <그림 16>과 같이 상류교차로와 하류교차로 간 교통류 밀집유형에 따라 3가지로 분류하여 대기행렬을 예측할 수 있다.



<그림 16> 대기행렬 길이 예측을 위한 교통류 밀집유형

① 긴 대기행렬로 예측시점까지 대기행렬을 모두 처리 할 수 없을 때

첫 번째 경우는 대기행렬이 길어 상류교차로의 남은 주기시간 동안 대기행렬을 모두 처리 할 수 없는 경우이다. 이 경우 예측 대상시점(상류교차로 주기 종료 시)에서의 대기차량수(*Queue*)는 현재 대기차량수( $v_B$ )와 상류교차로에서 진입하는 차량수( $v_A$ )에서 하류교차로 녹색신호동안 처리할 수 있는 차량수( $gR$ )를 제외하여 구할 수 있다. 이를 식으로 나타내면 식(3.15)과 같다.

여기서  $g$ 는 하류교차로의 다음 주기 녹색시간으로 현재 하류교차로의 주기길이와 현시시간은 아직 정해지지 않아 알 수 없는 변수이다. 따라서 지난 3주기 동안 평균 녹색시간으로 대체하여 사용할 수 있다.

$v_B$ 는 현 교차로에 설치된 검지기를 통해 현재 대기차량수를 구할 수 있지만,  $v_A$ 는 상류교차로의 현시상황에 따라 구하지 못할 수도 있다. 만약 현재 상류교차로의 연동방향 신호가 녹색신호 소등 이후라면  $v_A$ 는 연동방향 녹색신호동안 상류교차로에 설치된 검지기를 통과한 차량수를 이용해 산출할 수 있다. 하지만 현재 상류교차로의 연동방향 신호가 녹색신호 점등 중이라면  $v_A$ 는 아직 최종 결정된 상태가 아니기 때문에 검지기 통과차량수만으로는 산출할 수 없다. 따라서 이 경우에는 식(3.16)과 같이 현재 녹색시간동안 수집된 차량수 대비 남은 녹색시간동안 통과할 차량수를 추정하여 산정하였다.

$$Queue = (v_A + v_B) - (gR) , \quad \text{if } v_B/R > g \quad \dots(3.15)$$

여기서, *Queue* : 예측 대기차량수(대)

$v_A$  : 상류교차로에서 직진으로 진입하는 차량수(대/주기)

$v_B$  : 현재 대기차량수(대)

$g$  : 다음 주기 녹색시간(s) ( $\approx$ 지난 3주기 동안 평균 녹색시간)

$R$  : 초당 평균처리차량수(대/s)



$$v_A^{expect} = v_A^{collect} + (g^{remain} \times v_A^{collect}) / (g - g^{remain}) \quad \dots(3.16)$$

여기서,  $v_A^{expect}$  : 상류교차로에서 직진으로 진입할 차량수(대/주기)

$v_A^{collect}$  : 현재 수집된 상류교차로에서 직진으로 진입하는 차량수(대)

$g$  : 상류교차로의 연동방향 녹색시간(s)

$g^{remain}$  : 상류교차로의 연동방향 남은 녹색시간(s)

## ② 녹색시간동안 상류교차로에서 진입한 차량이 대기행렬의 저항 없이 통과할 수 있을 때

두 번째 경우는 대기행렬이 모두 처리되는데 걸리는 시간이 상류교차로에서 진입하는 차량이 대기행렬에 도착하는데 걸리는 시간보다 작을 경우이다. 이 경우에는 상류교차로에서 진입하는 차량은 대기행렬의 저항 없이 하류교차로의 녹색시간동안 통과할 수 있다. 이때 예측 대상시점에서의 대기차량수는 상류교차로에서 진입하는 차량수( $v_A$ )에서 하류교차로 다음 주기 녹색시간( $g$ ) 동안 빠져나간 차량수( $v_A^{passed}$ )를 제외함으로써 산정할 수 있다. 이를 식으로 나타내면 식(3.17)과 같다.

하지만 도로 위에 설치된 검지기는 상류교차로에서 진입하고 있는 차량과 대기행렬의 차량을 구분할 수 없기에 상류교차로에서 진입하는 차량 중 하류교차로 녹색시간 동안 빠져나간 차량수( $v_A^{passed}$ )는 검지기만으로 측정할 수 없다. 따라서  $v_A^{passed}$ 는 상류교차로에서 진입한 차량군이  $g$ 시간동안 하류교차로를 통과한 거리( $gS_A - (l - d_A)$ )를 산출하여 이를 차 두간격으로 나누어 녹색시간동안 빠져나간 차량수를 개략적으로 추정하였다.

$$Queue = v_A - v_A^{passed}, \quad \text{if } g > (l - d_A - d_B)/S_A > v_B/R \quad \dots(3.17)$$

$$v_A^{passed} = \frac{gS_A - (l - d_A)}{headway}$$

여기서,  $Queue$  : 예측 대기차량수(대)

$v_A$  : 상류교차로에서 직진으로 진입하는 차량수(대/주기)

$v_A^{passed}$  :  $v_A$  차량 중 다음 주기 녹색시간동안 통과할 차량수(대)

$v_B$  : 현재 대기차량수(대/주기)

$g$  : 다음 주기 녹색시간(s) ( $\approx$ 지난 3주기 동안 평균 녹색시간)

$R$  : 초당 평균처리차량수(대/s)

$l$  : 교차로 간 링크 거리(m)

$d_A$  : A그룹이 상류교차로에서 현재까지 이동한 거리(m)

$d_A^g$  : A그룹이 현재부터 녹색시간(g) 동안 이동할 거리(m)

$d_B$  : 대기행렬 길이(m)

$S_A$  : 차량 평균 속도(m/s)

$headway$  : 신호교차로에서의 차두간격(m)

### ③ 녹색시간동안 상류교차로에서 진입한 차량이 대기차량으로 제약받을 때

마지막으로 현재 대기행렬과 상류교차로에서 진입한 차량군 간 간격이 좁아 하류교차로 녹색시간동안 상류교차로에서 진입한 차량이 대기차량 뒤에 합류하게 되거나 현재 상류교차로에서 진입한 차량이 이미 대기차량 뒤에 합류한 경우이다. 이 경우 예측 대상시점의 대기행렬 길이는 첫 번째 경우와 마찬가지로 현재 대기차량수와 상류교차로에서 진입하는 차량수의 합에서 다음 주기 녹색신호동안 처리할 수 있는 차량수를 제외하여 구할 수 있다.



## IV. 모형 적용 결과 및 비교분석

### 1. 분석 방법론 개요

본 연구에서 제시한 방법론의 연동 효과를 분석하기 위해, 특정 시나리오 하에서 미시적 시뮬레이션 분석을 수행하여 본 연구에서 제시한 모형의 성능을 평가한다. 본 장에서의 분석은 크게 세 가지로 나뉜다.

첫째, 본 방법론의 연동 효과를 살펴보기 위해 기존의 주기변동기반 신호제어모형들과 퍼포먼스 비교, 검토한다. 기존의 주기변동기반 신호제어모형은 ‘신호 연동을 고려하지 않은 기존의 주기변동 모형’과 ‘목적함수 수정을 통해 특정방향의 신호 연동을 고려한 기존의 주기변동 모형’으로 구분한다. 분석결과를 용이하게 해석하기 위해 비교 대상 네트워크는 2개 교차로로 이루어진 소규모 네트워크를 사용하며, 각 모형 간 평가척도 비교를 통해 본 모형의 효과를 평가한다.

둘째, 소규모 네트워크뿐만 아니라 다수의 교차로로 이루어진 네트워크에서도 확장 적용 가능한지 살펴보기 위해 다수 교차로에서 신호 연동 시 효과를 비교 분석하고, 더 나아가 다양한 연동규모에서의 연동효과를 비교하여 주어진 시나리오에서 신호 연동 시 최대 효과를 발휘할 수 있는 교차로 연동규모를 검토한다. 비교 대상 네트워크는 6개 교차로로 이루어진 네트워크를 사용하며, 연동 교차로 수 묶음 단위는 2개, 3개, 4개, 6개씩으로 변화시켜 각 시나리오별 효과를 분석한다.

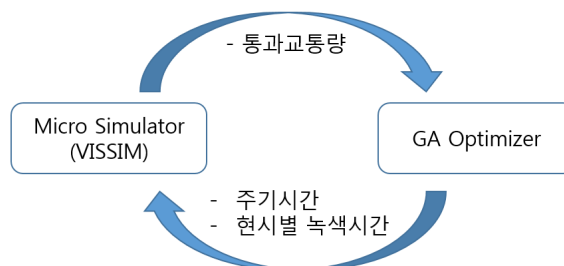
셋째, 지금까지 비대칭 교통량을 지닌 네트워크를 대상으로 분석한 것과 달리, 양방향 대칭 교통량을 지닌 네트워크에서의 효과를 분석하여 비대칭 교통량 네트워크 대비 어떠한 차이가 있는지 비교 분석한다.

주요 평가척도는 지체도와 신호 연동성으로 설정하였다. 지체도는 차량당 평균지체시간을 이용하며, 연동성은 차량의 평균정지횟수를 사용한다.

## 2. 시뮬레이터 및 분석 프로그램 개요

본 연구에서는 미시적인 차량행태에서 발생하는 지연 등 실제 교통상황의 임의성을 모델에 반영하기 위해 세부적인 차량행태 묘사가 가능한 미시적 교통시뮬레이션 툴, VISSIM ver 4.0을 이용한다. VISSIM은 COM interface 기능을 제공하여 타 프로그래밍 언어를 이용해 VISSIM을 제어 할 수 있도록 지원한다. 따라서 본 연구에서 제시한 방법론을 이용해 신호를 제어하기 위해서 Visual Basic을 이용해 별도의 신호제어 모듈을 제작하였다. 그 후 VISSIM의 COM interface 기능을 이용해 VISSIM과 별도로 제작한 외부 신호제어모듈을 연결하였다. 전체적인 프레임워크는 <그림 17>과 같다.

마이크로 시뮬레이터(VISSIM)에서는 교통류 제어를 담당하며 별도로 제작한 외부 모듈인 GA Optimizer는 신호최적화 및 신호제어를 담당한다. VISSIM은 실시간으로 각 차량의 운동을 제어 및 모니터링 하다가 각 교차로별 매 주기 시작 시 마다 GA Optimizer에게 신호를 최적화하는데 필요한 입력데이터를 제공한다. GA Optimizer는 VISSIM에서 제공한 교통데이터를 바탕으로 본 연구에서 제시한 방법론을 이용한 다음 주기 최적 신호시간을 계산하여 VISSIM에게 제공한다. VISSIM은 최적화된 신호시간을 기반으로 신호를 제어한다.



<그림 17> 분석 프로그램의 프레임워크

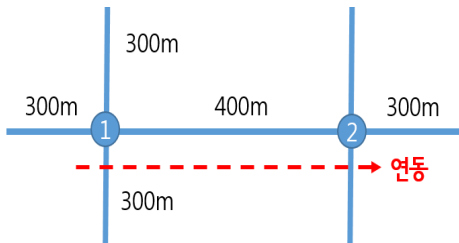
### 3. 기존의 주기변동 신호제어모형과 비교

#### 1) 분석 대상 네트워크

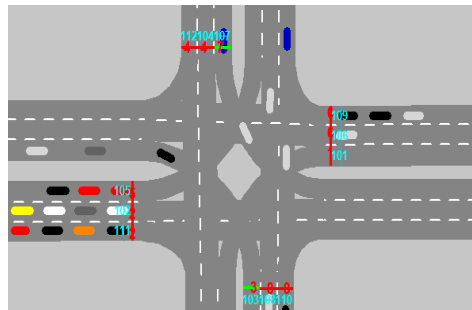
분석대상 네트워크는 <그림 18>과 같이 2개의 교차로로 설정하였다. 첫 번째 교차로는 중요교차로(CI)이고 주도로 유입(서->동) 방향의 신호 연동을 고려한다고 가정하였다.

분석대상 네트워크의 교차로간 거리는 실제 도심의 간선도로의 교통상황과 비슷하게 구현하기 위해, 서울시 간선도로 교차로 간 평균거리를 측정하였다. 서울시 간선도로 교차로 간 평균거리를 산출하기 위해, KTDB에서 배포하는 2009년 기준 전국권 네트워크 자료에서 고속도로를 제외한 서울시 일반도로 링크의 평균 거리값을 산출한 결과 약 439m인 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 교차로간 거리는 400m로 설정하였으며 이외 접근도로는 300m로 설정하였다.

교통량 또한 실제 도심의 첨두시 교통상황을 반영하기 위해 서울시에서 배포하는 2013년 기준 서울시 교통량 자료를 분석하였다. 평일 오전 첨두시(8~9시) 동안 특정 방향의 교통량이 두드러진 지점을 살펴본 결과, <그림 20>과 같이 주로 도심(서울시 중구)으로 향하는 도로에서 비대칭 교통상황이 발생하였다. 비대칭 교통상황이 발생하는 대표 지점들의 방향별 평균교통량을 산출한 결과, 유입, 유출 각각 1,867대/시, 991



<그림 18> 분석대상 네트워크



<그림 19> VISSIM으로 구현된 교차로

대/시로 나타났으며, 이때 유입교통량 대비 유출교통량 비율은 약 53%인 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 원활한 신호 연동에 초점을 맞추기 위해 비 포화 상태에서의 교통상황을 가정하고 주도로의 유입/유출 교통량을 침두시의 약 80% 수준인 1,500대/시, 800대/시로 설정하였다.



<그림 20> 방향별 비대칭 평일교통량 발생 지점

<표 4> 비대칭 교통상황 발생 지점의 평일 오전 침두(8시~9시)시 유입/유출 교통량

지점명	차로(편도)	유입(A, 대/시)	유출(B, 대/시)	비율(B/A)
구기터널	2	1,859	1,112	60%
자하문터널	2	1,652	733	44%
남산3호 터널	2	1,865	1,071	57%
신당(성동여상)	2*	1,792	954	53%
미아리고개	2*	2,169	1,085	50%
평균	-	1,867	991	53%

\* : 버스전용차로 제외

출처 : 서울특별시 교통운영과, 2013년 서울시 지점별 교통량, <http://traffic.seoul.go.kr>, 2014

각 신호교차로의 현시순서는 <표 3>과 같이 NEMA의 Dual-Ring 체계를 따르는 것으로 가정하였으며, 그 이외의 가정은 다음과 같다.

- 접근로별 차로수 : 좌회전 전용차로 1차로,  
직진차로 1차로, 직진/우회전 공용차로 1차로
- 최소/최대 주기시간 : 60초/130초      - 최소 녹색시간 : 10초
- 포화교통류율 : 1800대/시
- 평균주행속도 : 30km/h, 승용차로만 구성
- 주도로 회전비율 : 직진 70%, 좌회전 15%, 우회전 15%
- 부도로 회전비율 : 직진 50%, 좌회전 25%, 우회전 25%
- 초기 현시시간( $g_1, g_2, g_3, g_4$ ) : 35 / 25 / 35 / 25초
- 초기 현시시간( $g_5, g_6, g_7, g_8$ ) : 35 / 25 / 35 / 25초
- 주도로 교통량 : 유입(서->동) 1500대/시, 유출(동->서) 800대/시
- 부도로 교통량 : 접근로 별 800대/시

## 2) 비교 대상 모형

비교 분석 대상 모형은 기존의 주기변동 신호제어모형으로, 본 연구에서는 기존의 주기변동 신호제어모형을 ‘신호 연동을 고려하지 않은 기존의 주기변동 신호제어모형’과 ‘신호 연동을 고려한 기존의 주기변동 신호제어모형’으로 나누어 분석하였다.

### (1) 기존의 주기변동 신호제어모형(이하 기존모형)

신호 연동을 고려하지 않고 각 교차로별 주기 시작 시 전 주기 교통량정보를 이용하여 현 주기길이 및 현시시간을 최적화하는 일반적인 형태의 주기변동기반 신호제어모형이다. 차량 당 평균지체시간을 최소화하는 주기길이와 현시시간을 산출하며 이때 목적함수와 제약조건은 다음과 같다.



$$Find : C, G_i, \quad \text{for } i = 1, \dots, 8 \quad \dots(4.1)$$

$$Min Z = \frac{\sum D_i V_i}{\sum V_i}$$

subject to

$$G_1 + G_2 = G_5 + G_6, \quad G_3 + G_4 = G_7 + G_8$$

$$Min G_i \leq G_i, \quad \text{for } i = 1, \dots, 8$$

$$\sum_{i=1}^4 G_i = \sum_{i=5}^8 G_i = C$$

$$Min C \leq C \leq Max C$$

$$C, G_i \geq 0 \text{ and integer}$$

여기서,  $C$  : 주기길이(s),  $Z$  : 평균지체시간(s/대)

$G_i$  :  $i$ 이동류의 녹색시간(s)

$D_i$  :  $i$ 이동류의 지체시간(s)

$V_i$  :  $i$ 이동류의 교통량(대/주기)

$Min G_i$  : 현시별 최소녹색시간(s)

$Min C, Max C$  : 최소/최대 주기길이(s)

## (2) 신호 연동을 고려한 기존의 주기변동 신호제어모형(이하 기존연동모형)

신호 연동을 고려한 기존의 주기변동 신호제어모형과 비교하기 위해 이영인 외(2001)의 모형을 변형하여 사용하였다. 이영인 외(2001)의 연구에서는 특정 이동방향의 신호 연동성 향상을 위해, 목적함수 구성 시 신호 연동하려는 이동방향의 지체도만 고려하였다(<표 5> 참조). 하지만 이 경우 연동방향 이동류 외의 다른 이동류 지체도는 목적함수에서 고려하고 있지 않기 때문에 연동방향 이동류 외의 현시길이는 최적화 되지 않을 수 있다는 한계점을 지니고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 일반적인 지체도 최소화 모형에서 연동하려는 특정방향 이동류의 지체도에 가중치를 두는 형태로 목적함수를 수정하였다. 다만, 이 경우 설정한 가중치 값에 따라 교차로의 연동효

율은 달라질 수 있으므로 적정 가중치 설정을 위한 검토가 필요하다. 하지만 적정 가중치 값은 교차로의 교통상황에 따라 매번 달라질 수 있기 때문에 적정 가중치 산정에는 많은 어려움이 따를 것이다.

따라서 본 연구에서는 적정 가중치 산정 보다 특정방향의 지체도에 가중치를 둘 경우 교차로의 지체도와 신호 연동성에 어떤 영향을 미치는지를 분석하고, 이 경우 본 방법론과 비교하였을 때 어떠한 차이가 있는지에 초점을 맞추었다. 그래서 가중치 효과를 극대화할 수 있도록 <표 5>와 같이 가중치를 연동방향 이동류의 지체도를 제공하는 것으로 나타내었다.

그 이외에는 기존의 주기변동기반 신호제어모형과 동일하게, 각 교차로에서 주기 시작 시 전 주기 교통량정보를 이용하여 목적함수(지체도)를 최소화하는 현 주기의 길이 및 현시녹색시간을 산출하였다. 서->동 방향으로 신호 연동을 실시할 때(직전, 좌회전 이동류의 지체도( $D_2, D_5$ ))에 가중치 부여), 목적함수와 제약조건은 <표 5>와 같다.

<표 5> 수정된 기존연동모형의 목적함수

수정 전(이영인 외, 2001)	수정 후
$Find : C, G_i$ $Min Z = \frac{D_2 V_2 + D_5 V_5}{V_2 + V_5}$  <i>subject to</i> $G_1 + G_2 = G_5 + G_6$ $G_3 + G_4 = G_7 + G_8$ $Min G_i \leq G_i, \text{ for } i = 1, \dots, 8$ $\sum_{i=1}^4 G_i = \sum_{i=5}^8 G_i = C$ $Min C \leq C \leq Max C$ $C, G_i \geq 0 \text{ and integer}$	$Find : C, G_i$ $Min Z =$ $((D_2)^2 V_2 + (D_5)^2 V_5 + D_1 V_1 + D_3 V_3$ $+ D_4 V_4 + D_6 V_6 + D_7 V_7 + D_8 V_8) / \sum_{i=1}^8 V_i$  <i>subject to</i> $G_1 + G_2 = G_5 + G_6$ $G_3 + G_4 = G_7 + G_8$ $Min G_i \leq G_i, \text{ for } i = 1, \dots, 8$ $\sum_{i=1}^4 G_i = \sum_{i=5}^8 G_i = C$ $Min C \leq C \leq Max C$ $C, G_i \geq 0 \text{ and integer}$

### 3) 비교 분석 결과

‘신호 연동을 고려하지 않은 기존의 주기변동 신호제어모형(이하 기존모형)’과 ‘특정 이동류의 지체도에 가중치를 두는 것으로 신호 연동을 고려한 기존의 주기변동 신호제어모형(이하 기존연동모형)’, 그리고 본 연구에서 제시한 ‘신호 연동값을 고려한 새로운 주기변동 신호제어모형(이하 신규모형)’을 비교하기 위해 동일한 조건하에서 30분 동안 시물레이션 분석을 실시하였다.

단, 신호 최적화를 위해 사용한 유전자 알고리즘은 경험적 알고리즘으로 수행 시 마다 전역 최적해를 보장하지 않는다. 만약 유전자 알고리즘을 통해 전역 최적해를 구하려면, 많은 인구를 유지하면서 많은 세대를 내려갈 필요가 있다. 하지만 실시간 신호제어모형은 최적화에 필요한 소요시간이 현실적으로 제한되어 있기 때문에 대부분의 경우에는 세대가 일정 수준 진행되었거나 해가 특정 조건을 만족하게 되면 알고리즘을 종료하도록 설정한다. 따라서 유전자 알고리즘으로 산정한 해는 최적해에 가까운 지역해일 확률이 높으며, 이러한 이유로 시물레이션 수행 시 마다 결과값에 다소 차이가 발생할 수 있다.

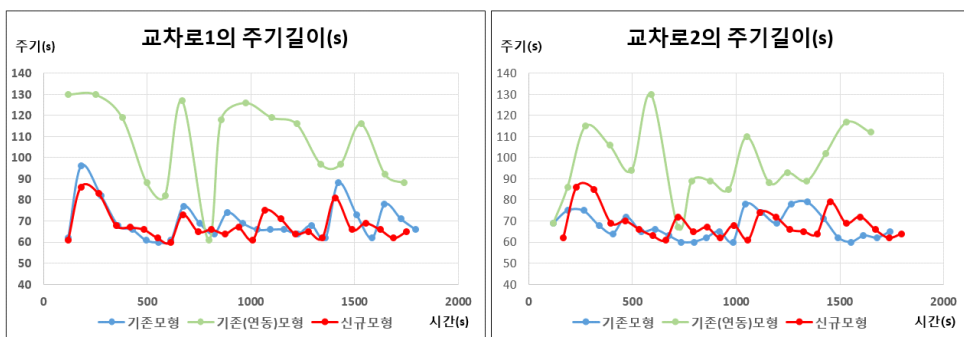
이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 각 모형마다 동일한 조건에서 30번씩 반복 실행한 후 각 모형별 평가척도의 평균값을 비교하였다. 또한 모형별 평가척도의 평균값 차이가 통계적으로 유의한지를 확인하기 위해 t검정 및 Mann-Whitney U 검정을 실시하였다. 단, 모형별 미시적 비교분석이 필요할 경우에는 가장 좋은 퍼포먼스를 보이는 시나리오를 선택하여 비교 분석하였다.

각 모형별 교차로의 주기길이 변화, 누적 대기차량수, 누적 통과차량수 및 평가척도를 비교한 결과는 다음과 같다.

## (1) 주기 길이

각 모형별 최적 시나리오의 교차로별 주기 길이 변화는 <그림 21>과 같다. 먼저 기존모형과 기존연동모형, 신규모형의 주기길이를 살펴보면, 각 교통량 상황에 맞춰 매 주기마다 변동되는 것을 확인할 수 있다. 또한 기존모형과 기존연동모형은 교차로1와 교차로2의 주기길이가 서로 관계없이 독립적으로 설정되는 반면, 신규모형은 교차로2의 주기길이가 교차로1의 주기길이에 연동값을 고려하여 설정되어, 교차로1의 주기길이와 교차로2 주기길이는 유사하게 결정되었다. 참고로 신규모형에서는 교차로 간 대기차량수가 적을 경우 연동값이 일정하게 설정되어 교차로1, 교차로2 간 주기길이는 유사하게 설정되고, 연동 교차로 간 대기차량수가 많을 경우에는 연동값의 변화폭이 커져서 교차로 간 주기길이에 큰 차이를 보이게 된다.

기존연동모형의 경우 다른 모형에 비해 상대적으로 주기길이가 크게 설정된 것을 확인 할 수 있는데 이것은 목적함수에서 고려한 연동방향의 지체 가중치가 연동방향의 녹색시간을 상대적으로 늘리면서 해당주기의 길이 또한 크게 설정된 것으로 분석된다.

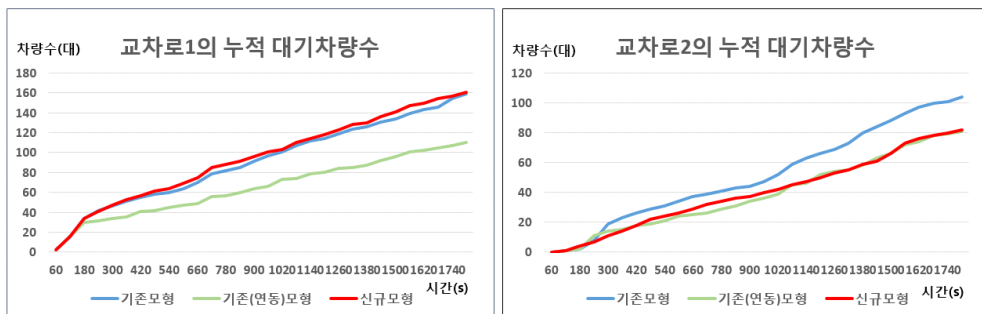


<그림 21> 모형별 교차로별 주기길이 변화

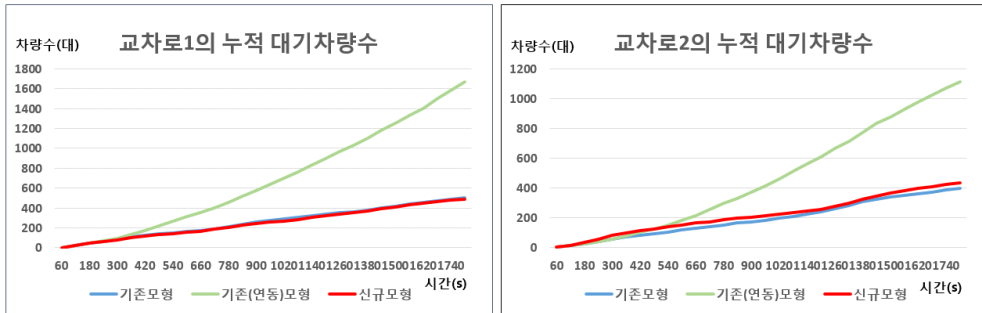
## (2) 누적 대기차량수

각 모형별 최적시나리오의 교차로별 연동방향(서→동)의 누적 대기차량수는 <그림 22>와 같다. 여기서 누적 대기차량수는 교차로 연동방향의 대기차량수를 1분 간격으로 누적시켜 산정하였다. 그 결과 기존연동모형의 대기차량수가 제일 낮게 산출되었으며, 그 다음으로 신규모형, 기존모형 순으로 작게 산출되었다. 하지만 <그림 23>과 같이 연동방향이외에 교차로 4방향의 대기차량수를 합한 누적 대기차량수를 살펴보면 이와 반대의 결과를 보여준다. 기존연동모형의 대기차량수는 타 모형에 비해 상대적으로 높게 산정되었으며 기존모형과 본모형의 경우 상대적으로 낮게 산정되었다.

종합해보면, 기존연동모형의 경우 연동방향의 녹색시간을 늘려줌으로써 연동방향의 교통흐름이 원활하게 되어 대기차량수는 줄어들었지만, 비 연동방향의 대기시간은 더 증가되어 교통상황은 오히려 악화되고 그 결과 모든 방향의 대기차량수의 합은 타 모형에 비해 상대적으로 크게 산출된 것으로 분석된다. 반면, 신규모형의 경우 기존 모형과 같이 모든 방향의 대기차량수의 합은 상대적으로 적으면서 신호 연동을 고려한 연동방향의 대기차량수 또한 작게 유지되는 것으로 보아 신규모형은 비 연동방향의 교통상황 악화를 최소화하며 연동방향의 교통흐름을 원활하게 한 것으로 분석된다.



<그림 22> 모형별 교차로별 연동방향의 누적 대기차량수

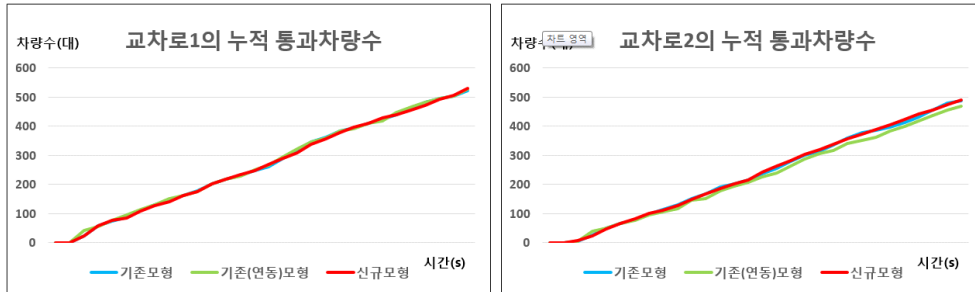


<그림 23> 모형별 교차로별 모든 방향의 누적 대기차량수

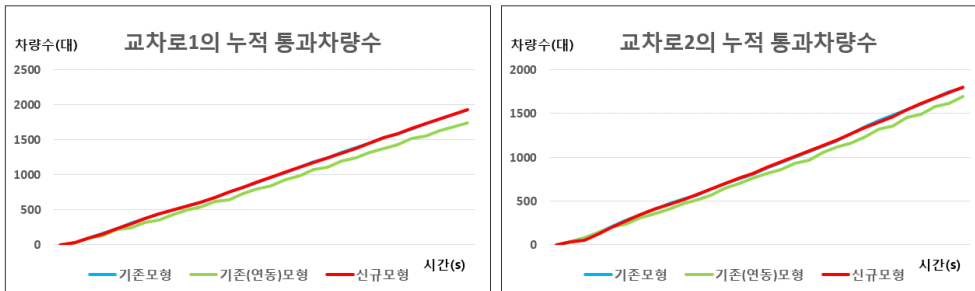
### (3) 누적 통과차량수

각 모형별 최적시나리오의 교차로별 누적 통과차량수는 <그림 24>와 같다. 여기서 누적 통과차량수는 교차로별 연동방향의 통과차량수를 1분 간격으로 누적시킨 값이다. 기존연동모형의 누적 통과차량수는 근소한 차이지만 타 모형에 비해 상대적으로 낮게 산정되었으며 신규모형, 기존모형은 이보다 높게 산출되었다. 이것은 누적 대기차량수 측면에서 좋은 결과를 보여주었던 기존연동모형의 결과와 상반된 결과인데, 이것은 연동방향의 녹색현시시간이 지나치게 할당되어 통과차량 없이 녹색신호가 켜있는 시간이 자주 발생하게 되고, 이로 인해 대기차량수와 통과차량수 모두 타 모형에 비해 상대적으로 낮게 산정된 것으로 추정된다.

교차로 모든 방향의 통과차량수를 합한 누적 통과차량수를 살펴보면 이 역시 기존연동모형이 기존모형과 신규모형 보다 누적 통과차량수가 낮게 산출되었다(<그림 25> 참조). 기존연동모형과 타 모형의 차이는 연동방향의 누적 통과차량수에 비해 더욱 커진 것을 확인할 수 있는데, 이것은 기존연동모형의 경우 연동방향의 녹색시간이 지나치게 할당되어 통과차량 없이 녹색시간만 낭비되는 비효율성이 발생되고, 비 연동방향 또한 대기시간 증가(교통상황 악화)로 인한 통과차량 감소효과가 발생하기 때문인 것으로 분석된다.



<그림 24> 모형별 교차로별 연동방향의 누적 통과차량수



<그림 25> 모형별 교차로별 모든 방향의 누적 통과차량수

#### (4) 평가척도

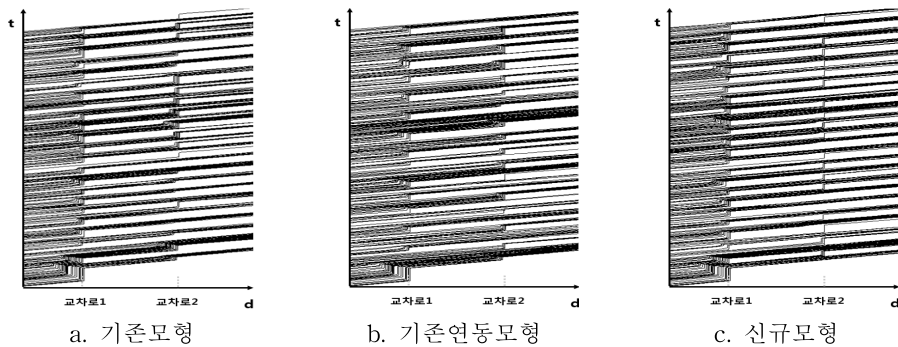
모형의 성능을 평가하기 위한 평가척도는 지체도와 연동성으로 정의하였다. 지체도는 VISSIM에서 제공하는 차량 당 평균지체시간을 사용하였고, 연동성을 평가하기 위한 척도로는 VISSIM에서 제공하는 차량 당 평균정지횟수를 사용하였다.

모형별 반복실행(30번)에 따른 평가척도별 평균값을 살펴보면 <표 6>~<표 9>와 같다. 먼저 신호 연동방향의 지체도<sup>5)</sup>(평균지체시간)를 살펴보면 지체도의 평균값은 기존연동모형과 신규모형이 기존 모형에 비해 낮게 산정되었으며, 그 중 신규모형이 미미하지만 기존연동모형보다 더 낮게 산정되었다. 신호 연동방향의 연동성 역시 기존연동모형과 신규모

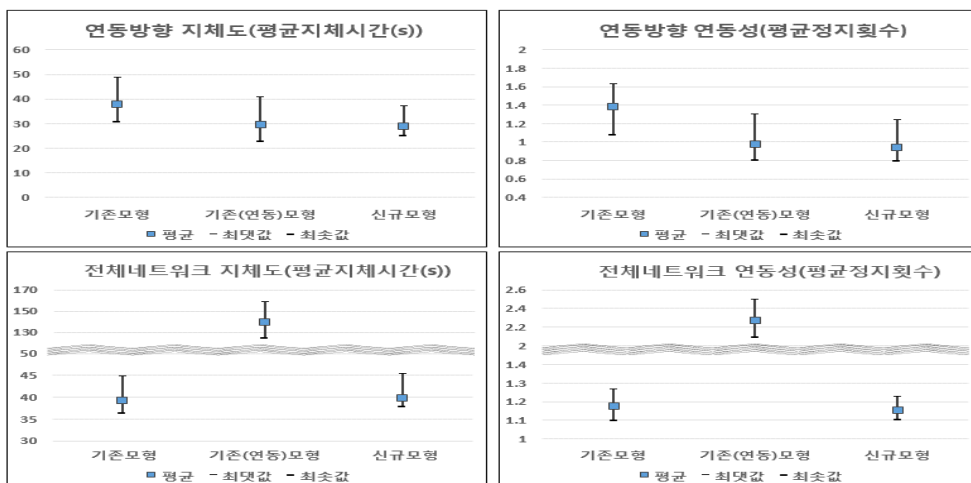
5) 신호 연동방향의 지체도 및 연동성은 서->동방향의 주도로를 통과하는 차량의 평균 지체도 및 정지 횟수로 산정함.

형이 기존 모형에 비해 낮게 산정되었으며, 그 중 신규모형이 가장 낮게 산정되었다. 따라서 기존연동모형과 신규모형은 기존모형에 비해 연동방향의 퍼포먼스(지체도 및 연동성)가 향상되었다고 할 수 있다.

연동성 향상을 보다 가시적으로 확인하기 위해 <그림 26>과 같이 주도로를 통과하는 차량들의 궤적을 시공도로 나타내었다. 그림에서 첫 번째 신호교차로는 신호 연동이 시작하는 첫 번째 교차로써 신호 연동의 영향을 받지 않아 많은 차량들이 정차를 하고 있지만, 신호 연동된 두 번째 교차로의 정차하는 차량의 수를 살펴보면 기존 모형에 비해 많이 줄어든 것을 확인 할 수 있다.



<그림 26> 주도로를 통과하는 차량들의 궤적(시공도)



<그림 27> 모형별 평가척도



<표 6> 모형별 신호 연동방향의 지체도 비교 (교차로 2개)

	기존모형(A)	기존연동모형(B)	증감률 ((B-A)/A)	신규모형(C)	증감률 ((C-A)/A)
평균	37.88	29.51	<b>-22%*</b>	29.08	<b>-23%*</b>
최대값	48.80	40.80	-16%	37.10	-24%
최소값	30.50	22.70	-26%	24.90	-18%

주) 신호 연동방향 지체도는 주도로(서->동)를 통과하는 차량들의 평균 지체시간을 의미.

\* : 기존모형의 평가척도값 대비 통계적으로 차이가 유의미함. (4장 3절 (5) 참조)

<표 7> 모형별 신호 연동방향의 연동성 비교 (교차로 2개)

	기존모형(A)	기존연동모형(B)	증감률 ((B-A)/A)	신규모형(C)	증감률 ((C-A)/A)
평균	1.38	0.98	<b>-29%*</b>	0.94	<b>-32%*</b>
최대값	1.63	1.30	-20%	1.24	-24%
최소값	1.07	0.80	-25%	0.79	-26%

주) 신호 연동방향 연동성은 주도로(서->동)를 통과하는 차량들의 평균 정지횟수를 의미.

\* : 기존모형의 평가척도값 대비 통계적으로 차이가 유의미함. (4장 3절 (5) 참조)

<표 8> 모형별 전체 네트워크의 지체도 비교 (교차로 2개)

	기존모형(A)	기존연동모형(B)	증감률 ((B-A)/A)	신규모형(C)	증감률 ((C-A)/A)
평균	39.30	139.29	<b>254%*</b>	39.76	1%
최대값	44.73	158.64	255%	45.41	2%
최소값	36.38	124.38	242%	37.71	4%

주) 네트워크 지체도는 모든 차량들의 평균 지체시간을 의미.

\* : 기존모형의 평가척도값 대비 통계적으로 차이가 유의미함. (4장 3절 (5) 참조)

<표 9> 모형별 전체 네트워크의 연동성 비교 (교차로 2개)

	기존모형(A)	기존연동모형(B)	증감률 ((B-A)/A)	신규모형(C)	증감률 ((C-A)/A)
평균	1.18	2.27	<b>92%*</b>	1.15	<b>-2%*</b>
최대값	1.27	2.49	97%	1.23	-3%
최소값	1.10	2.09	90%	1.10	0%

주) 네트워크 연동성은 모든 차량들의 평균 정지횟수를 의미.

\* : 기존모형의 평가척도값 대비 통계적으로 차이가 유의미함. (4장 3절 (5) 참조)

하지만 전체 네트워크 측면에서의 평가척도값을 살펴보면, 기존연동 모형은 기존모형과 신규모형에 비해 매우 높은 값을 나타내지만, 신규모형은 기존모형과 비슷한 지체도와 연동성을 보여 준다. 이것은 앞에서 살펴보았듯이 기존연동모형은 연동방향의 지체도에 가중치를 두므로써 연동방향의 녹색시간에 지나치게 많은 시간이 할당되고, 이러한 이유로 비 연동방향의 대기시간은 크게 증가하여 전체 네트워크 측면의 교통상황을 크게 악화시켰기 때문이다. 실제 기존연동모형의 신호 연동방향 지체도와 전체 네트워크 측면에서의 지체도 절댓값을 비교해보면 기존모형과는 달리 매우 크게 차이나는 것을 확인할 수 있다. 이는 연동방향의 지체도와 비 연동방향의 지체도의 절댓값 차이가 크기 때문이다.

그에 반해 신규모형은 연동성을 고려함과 동시에 모든 방향에서의 지체도를 최소화하도록 현시를 할당하기 때문에 비 연동방향의 지체도 및 연동성의 저하를 최소화 하는 방향으로 특정 연동방향의 교통흐름을 향상시킨다. 실제 신규모형의 전체 네트워크 지체도와 기존모형의 네트워크 지체도를 비교해보면, 신규모형의 네트워크 지체도가 약 1% 정도 높아 신규모형 역시 비 연동방향의 지체도 저하를 미미하게나마 야기한다고 미루어 짐작할 수 있지만, 기존연동모형에 비해 그 차이는 아주 작다는 점을 고려한다면 신규모형은 비 연동방향의 지체도 저하를 최소화 하는 방향으로 특정 연동방향의 연동성을 향상시키는 신호현시를 할당한 것으로 볼 수 있다.

#### (5) 모형 간 평가척도 통계적 차이 분석

앞에서 산출한 각 모형 간 평가척도값의 차이가 통계적으로 유의미한지 확인하기 위해 통계분석을 추가적으로 수행하였다. 각 모형별 평가척도의 평균값에 차이가 존재하는 지 모수 통계분석을 수행하기 위해, 먼저 각 모형별 평가척도 데이터가 정규성과 등분산성 가정을 만족하는지 검증하였다. 정규성과 등분산성 가정을 모두 만족하는 경우에는 독립표본 t-검정을 사용하였으며, 만약 정규성을 만족하지 못할 경우에는 비

모수 검정방법인 Mann-Whitney U 검정을, 등분산성 가정을 만족하지 못할 경우에는 Welch's t-검정(Welch-Aspin검정)을 수행하였다.

### ① 연동방향의 지체도

모형별 정규성 검정을 위해 Shapiro-Wilk검정<sup>6)</sup>을 수행한 결과, <표 10>과 같이 기존모형은 정규성을 만족하지만 기존연동모형 및 신규모형은 p값이 유의수준(0.05)보다 작아 정규성을 만족하지 않는 것으로 나타났다. 목적변량이 정규성을 갖도록 하기 위해 연동방향의 지체도에 대해 로그변환을 수행한 후 정규성 검정을 재확인하였다. 그 결과 <표 11>과 같이 모든 모형에서 정규성을 만족하는 것으로 나타났다.

그 후 Levene의 등분산성 검정을 통해 비교모형별 등분산성을 확인하였다. 그 결과 <표 12>와 같이 일부 모형에서 등분산성을 만족하지 않는 것으로 나타났다. 따라서 등분산성 가정을 만족하는 기존-신규모형은 t검정을 실시하였으며, 등분산성 가정을 만족하지 않는 기존-기존연동모형, 기존연동-신규모형은 Welch's t-검정을 실시하였다.

<표 10> 연동방향 지체도의 정규성 검정 결과

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
기존모형	.111	30	.200	.978	30	.781*
기존연동모형	.141	30	.134	.913	30	.018
신규모형	.139	30	.144	.913	30	.018

a : Lilliefors 유의확률 수정

\* : p > 0.05

<표 11> 로그 변환한 연동방향 지체도의 정규성 검정 결과

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
기존모형	.091	30	.200	.989	30	.982*
기존연동모형	.133	30	.182	.938	30	.080*
신규모형	.117	30	.200	.939	30	.087*

a : Lilliefors 유의확률 수정

\* : p > 0.05

6) Razali N.M. et al.(2011)에 따르면 Shapiro-Wilk검정은 Lilliefors 유의수준을 가지는 Kolmogorov-Smirnov 테스트 보다 좀 더 확실한 결과를 제공한다.

비교모형별 연동방향 지체도의 t-검정 및 Welch's t-검정 결과 <표 13>과 같이 기존-기존연동모형 간, 기존-신규모형 간 연동방향 지체도의 차이는 통계적으로 유의한 반면, 기존연동-신규모형 간 연동방향 지체도의 차이는 통계적으로 유의 하지 않는 것으로 분석되었다.

<표 12> 비교모형별 연동방향 지체도 등분산성 검정 결과

비교모형	Levene의 등분산 검정	
	F	Sig.
기존모형-기존연동모형	7.156	.010
기존모형-신규모형	.000	1.000*
기존연동모형-신규모형	7.436	.008

\* : p > 0.05

<표 13> 비교모형별 연동방향 지체도의 t-검정 및 Welch's t-검정 결과

비교모형	독립표본 t-검정 및 Welch's t-검정			
	가정	t	df	Sig.
기존모형-기존연동모형	이분산성	7.260	50.374	.000
기존모형-신규모형	등분산성	9.646	58	.000
기존연동모형-신규모형	이분산성	.208	49.804	.836*

\* : p > 0.05

일반적으로 두 집단의 평균 차이분석은 데이터의 정규성과 등분산성 가정 하에 t검증을 사용한다. 하지만 일부모형에서 정규성을 만족하지 못해 목적변량에 로그변환을 사용하였고, 그럼에도 불구하고 등분산성 가정도 만족하지 못해 최종적으로는 이분산성을 가정한 Welch's t-검정을 사용하였다. 본 연구에서는 이러한 결과에 신뢰성을 더하기 위해 정규성과 등분산성을 만족하지 않을 때 사용되는 비모수 통계분석인 Mann-Whitney U 검정을 추가 수행하였다.

Mann-Whitney U 검정은 데이터들을 순위 별로 나열시킨 후 각 집단의 순위정보를 통해 계산된 통계값 U를 이용하여 서로 독립된 두 표본간의 분포의 차이(동질성)를 검정하는 방법이다. 이것은 비모수 통계

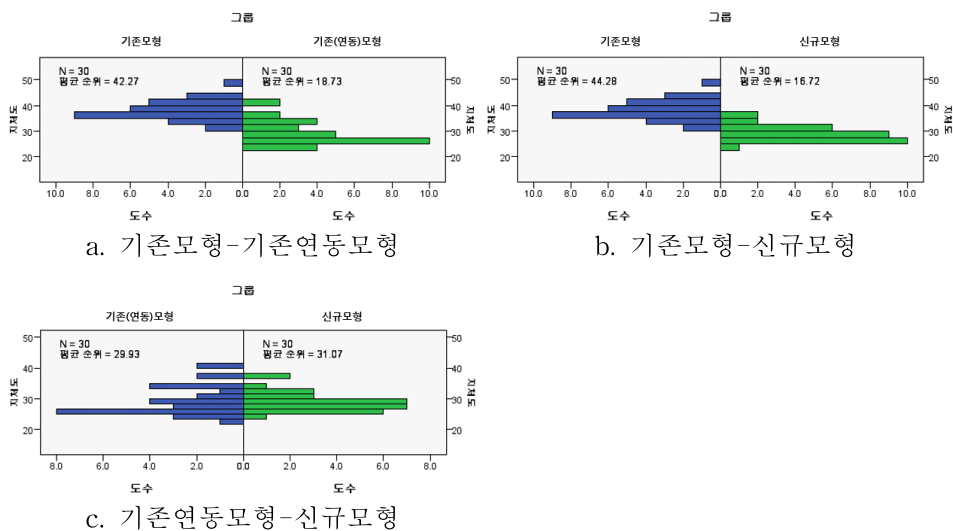
에 속하며, 모수 통계에 있어서 두 표본 간 평균치 차이를 검정하는 독립표본 t검정에 상당하는 검정법이다.

Mann-Whitney U 검정 결과, 기존의 t-검정 및 Welch's t-검정 결과와 동일하게 기존-기존연동모형 간, 기존-신규모형 간 연동방향 지체도의 차이는 통계적으로 유의한 반면, 기존연동-신규모형 간 연동방향 지체도의 차이는 통계적으로 유의 하지 않는 것으로 분석되었다. <그림 28>은 비교모형 간 연동방향 지체도 순위 분포를 도식화한 것이다.

<표 14> 비교모형별 연동방향 지체도 Mann-Whitney U 검정 결과

비교모형	Mann-Whitney U 검정				
	모형	N	평균순위	U	Sig.
기존모형-기존연동모형	기존	30	42.27	97.000	.000
	기존연동	30	18.73		
기존모형-신규모형	기존	30	44.28	36.5	.000
	신규	30	16.72		
기존연동모형-신규모형	기존연동	30	29.93	467.000	.802*
	신규	30	31.07		

\* :  $p > 0.05$



<그림 28> 비교모형별 연동방향 지체도 Mann-Whitney U 검정 결과

## ② 연동방향의 연동성

모형별 정규성 검정을 위해 Shapiro-Wilk검정을 수행한 결과, <표 15>와 같이 기존모형 및 신규모형은 정규성을 만족하지만 기존연동모형은 정규성을 만족하지 않는 것으로 나타났다. 따라서 로그변환을 통해 연동방향의 연동성을 변환한 후 정규성 검정을 재확인하였다. 그 결과 <표 16>과 같이 모든 모형에서 정규성을 만족하는 것으로 나타났다.

그 후 Levene의 등분산성 검정을 통해 비교모형별 등분산성을 확인하였다. 그 결과 <표 17>과 같이 모든 모형에서 등분산성을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 모수 통계분석인 독립표본 t-검정을 실시하였다.

비교모형별 연동방향 연동성의 t-검정 결과 <표 18>과 같이 기존-기존연동모형, 기존-신규모형의 연동방향 연동성의 평균값 차이는 통계적으로 유의하게 나타났으며, 기존연동-신규모형 간 연동성의 평균값 차이는 유의하지 않는 것으로 나타났다.

<표 15> 연동방향 연동성의 정규성 검정 결과

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
기존모형	.092	30	.200	.982	30	.881*
기존연동모형	.153	30	.070	.911	30	.016
신규모형	.116	30	.200	.936	30	.073*

a : Lilliefors 유의확률 수정

\* : p > 0.05

<표 16> 로그 변환한 연동방향 연동성의 정규성 검정 결과

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
기존모형	.106	30	.200	.970	30	.540*
기존연동모형	.137	30	.155	.939	30	.084*
신규모형	.111	30	.200	.954	30	.213*

a : Lilliefors 유의확률 수정

\* : p > 0.05

<표 17> 비교모형별 연동방향 연동성의 등분산성 검정 결과

비교모형	Levene의 등분산 검정	
	F	Sig.
기존모형-기존연동모형	1.367	.247*
기존모형-신규모형	.230	.634*
기존연동모형-신규모형	.496	.484*

\* :  $p > 0.05$

<표 18> 비교모형별 연동방향 연동성의 독립표본 t검정 결과

비교모형	독립표본 t검정		
	t	df	Sig.
기존모형-기존연동모형	11.661	58	.000
기존모형-신규모형	13.890	58	.000
기존연동모형-신규모형	1.235	58	.222*

\* :  $p > 0.05$

### ③ 네트워크의 지체도

모형별 정규성 검정을 위해 Shapiro-Wilk검정을 수행한 결과, <표 19>와 같이 기존모형 및 기존연동모형은 정규성을 만족하지만 신규모형은 정규성을 만족하지 않는 것으로 나타났다. 따라서 로그변환을 통해 네트워크 지체도를 변환한 후 정규성 검정을 다시 확인하였는데, 여전히 기존모형 및 기존연동모형에서만 정규성을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 일부모형에서 정규성을 만족하지 않는 것으로 나타나 비모수 통계분석인 Mann-Whitney U 검정을 실시하였다.

비교모형 간 동질성 검사 결과, <표 21>과 같이 기존-기존연동모형 간, 기존연동-신규모형 간 전체 네트워크 측면의 지체도 차이는 통계적으로 유의한 반면, 기존-신규모형 간 네트워크 지체도의 차이는 통계적으로 유의하지 않는 것으로 분석되었다. <그림 29>는 비교모형 간 전체 네트워크 측면에서의 지체도 순위 분포를 도식화한 것이다.

<표 19> 네트워크 지체도의 정규성 검정 결과

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
기존모형	.123	30	.200	.947	30	.140*
기존연동모형	.112	30	.200	.974	30	.651*
신규모형	.158	30	.054	.878	30	.002

a : Lilliefors 유의확률 수정

\* :  $p > 0.05$

<표 20> 로그 변환한 네트워크 지체도의 정규성 검정 결과

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
기존모형	.117	30	.200	.955	30	.236*
기존연동모형	.102	30	.200	.982	30	.880*
신규모형	.150	30	.084	.891	30	.005

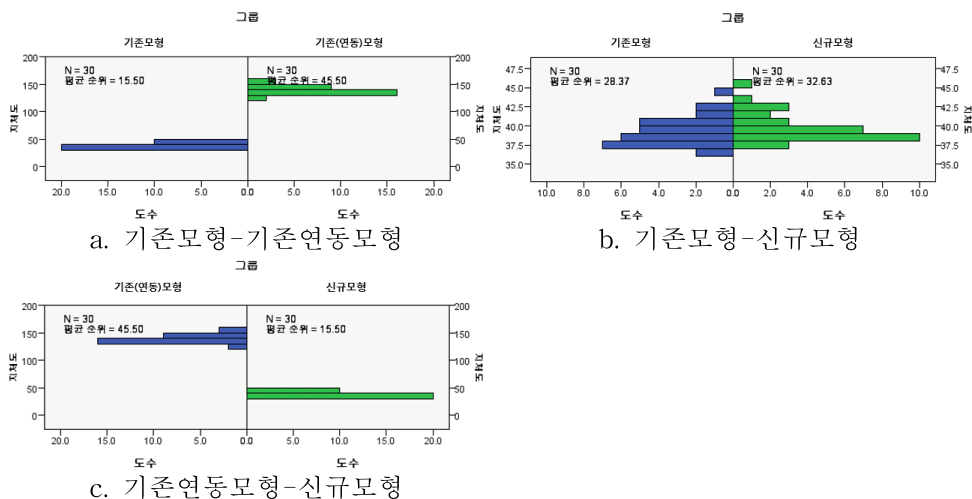
a : Lilliefors 유의확률 수정

\* :  $p > 0.05$

<표 21> 비교모형별 네트워크 지체도 Mann-Whitney U 검정 결과

비교모형	Mann-Whitney U 검정				
	모형	N	평균순위	U	Sig.
기존모형-기존연동모형	기존	30	15.50	900.000	.000
	기존연동	30	45.50		
기존모형-신규모형	기존	30	28.37	514.000	.344*
	신규	30	32.63		
기존연동모형-신규모형	기존연동	30	45.50	.000	.000
	신규	30	15.50		

\* :  $p > 0.05$



<그림 29> 비교모형별 네트워크 지체도 Mann-Whitney U 검정 결과



#### ④ 네트워크의 연동성

모형별 정규성 검정을 위해 Shapiro-Wilk검정을 수행한 결과, <표 22>와 같이 모든 모형에서 정규성을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 비교모형별 등분산성을 확인하기 위해 Levene의 등분산성 검정을 실시하였다. 그 결과 <표 23>과 같이 기존-신규모형에서만 등분산성을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 등분산성 가정을 만족하는 기존-신규모형은 t검정을 실시하였으며, 등분산성 가정을 만족하지 않는 기존-기존연동모형, 기존연동-신규모형은 Welch's t-검정을 실시하였다.

비교모형별 네트워크 연동성의 t-검정 및 Welch's t-검정 결과 <표 24>와 같이 모든 비교모형별 전체 네트워크 측면에서의 연동성 차이는 통계적으로 유의한 것으로 분석되었다.

<표 22> 네트워크 연동성의 정규성 검정 결과

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
기존모형	.090	30	.200	.978	30	.780*
기존연동모형	.099	30	.200	.979	30	.807*
신규모형	.149	30	.086	.933	30	.059*

a : Lilliefors 유의확률 수정

\* : p > 0.05

<표 23> 비교모형별 네트워크 연동성의 등분산성 검정 결과

비교모형	Levene의 등분산 검정	
	F	Sig.
기존모형-기존연동모형	14.507	.000
기존모형-신규모형	.602	.441*
기존연동모형-신규모형	18.167	.000

\* : p > 0.05

<표 24> 비교모형별 네트워크 연동성의 t-검정 및 Welch's t-검정 결과

비교모형	독립표본 t-검정 및 Welch's t-검정			
	가정	t	df	Sig.
기존모형-기존연동모형	이분산성	-54.110	38.099	.000
기존모형-신규모형	등분산성	2.436	58	.018
기존연동모형-신규모형	이분산성	56.440	35.549	.000

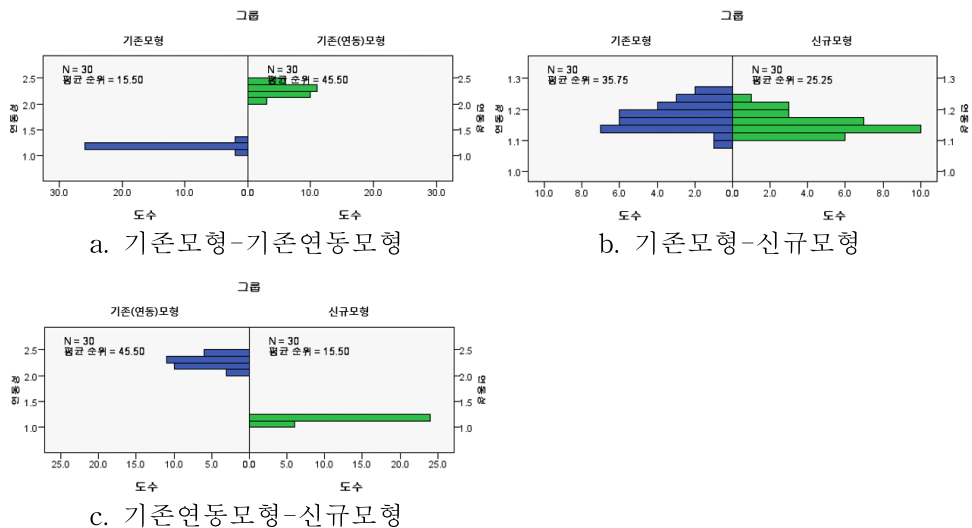
\* : p > 0.05

추가적으로 Mann-Whitney U 검정을 실시한 결과, <표 25>와 같이 기존의 t-검정 및 Welch's t-검정 결과와 동일하게 95% 유의수준에서 모든 비교모형에서 네트워크 연동성의 차이는 통계적으로 유의한 것으로 분석되었다. <그림 30>은 비교모형 간 전체 네트워크 측면에서의 연동성 순위 분포를 도식화한 것이다.

<표 25> 비교모형별 네트워크 연동성 Mann-Whitney U 검정 결과

비교모형	Mann-Whitney U 검정				
	모형	N	평균순위	U	Sig.
기존모형-기존연동모형	기존	30	15.50	900.000	.000
	기존연동	30	45.50		
기존모형-신규모형	기존	30	35.75	292.500	.020
	신규	30	25.25		
기존연동모형-신규모형	기존연동	30	45.50	.000	.000
	신규	30	15.50		

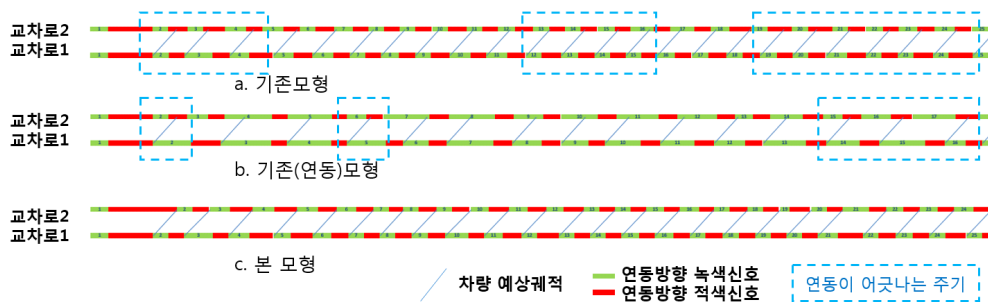
\* :  $p > 0.05$



<그림 30> 비교모형별 네트워크 연동성 Mann-Whitney U 검정 결과

## (6) 모형 검증

신규모형의 경우 본 연구에서 제시한 방법론대로 잘 적용되어 정상적으로 신호 연동되었는지 신호 연동정도를 살펴보기 위해, 교차로별 연동방향의 신호운영현황을 <그림 31>과 같이 시공도로 간단히 나타내었다. 이 그림은 교차로별 연동방향의 녹색신호길이와 적색신호길이를 나타내주어 교차로 간 신호 연동정도를 확인해 볼 수 있다. 기존모형과 기존연동모형의 경우 연동값(교차로 간 녹색신호 시작 시점 차이)을 고려하지 않으므로 신호 연동과 상관없이 주기길이 및 현시시간이 결정되었다. 실제 기존모형의 경우 연동이 어긋나는 경우가 빈번히 발생하였으며, 기존연동모형의 경우 연동방향의 녹색시간이 상대적으로 길어서 우연히 연동이 이루어지는 경우가 있지만 여전히 두, 세 차례 연동이 크게 어긋나는 경우가 발생하였다. 반면 신호 연동을 고려한 신규모형의 경우 두 번째 신호 주기부터 교차로 간 상황에 따라 연동값을 고려하여 주기길이 및 현시시간을 할당함으로써 상대적으로 신호 연동이 잘 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.



<그림 31> 모형별 연동방향 신호현황(시공도)

## (7) 소결론

‘신호 연동을 고려하지 않은 기존의 주기변동기반 신호제어모형(이하 기존모형)’과 ‘특정 이동류의 지체도에 가중치를 두는 것으로 신호 연동을 고려한 기존의 주기변동기반 모형(이하 기존연동모형)’, 그리고 본 연구에서 제시한 ‘신호 연동값을 고려한 새로운 주기변동기반 모형(이하 신규모형)’의 평가척도를 비교하였다.

그 결과, 기존연동모형은 기존모형에 비해 연동방향의 지체도 및 연동성이 각각 22%, 29% 향상되지만, 전체 네트워크 측면에서의 지체도 및 연동성은 각각 254%, 92%로 크게 저하되는 것으로 분석되었다.

반면 신규모형은 기존모형에 비해 연동방향의 지체도 및 연동성은 각각 23%, 32% 향상되며, 전체 네트워크 측면의 지체도는 약 1% 저하, 연동성은 약 2% 향상되는 것으로 분석되었다. 이러한 평가척도의 차이가 통계적으로 유의미 한지 추가적으로 통계분석을 실시한 결과, 신규모형의 네트워크 지체도를 제외한 나머지 평가척도의 차이는 유의미한 것으로 분석되었다. 따라서 신규모형은 기존연동모형과 달리 전체 네트워크 측면에서 지체도 및 연동성의 저하 없이 연동방향의 연동성을 크게 향상시킬 수 있다고 해석할 수 있다.

이렇듯 기존연동모형과 신규모형의 평가결과에 큰 차이가 발생하는 이유는 기존연동모형의 경우 연동방향의 녹색현시시간이 상대적으로 더 많이 할당되어 연동방향의 교통상황은 다소 개선될 수 있지만 통과교통량 대비 신호시간이 지나치게 할당되어 비효율성이 존재하며, 비 연동방향의 늘어난 대기시간으로 인해 쌓인 대기차량수에 비해 비 연동방향의 녹색시간은 상대적으로 작게 할당되어 교통상황 악화되었기 때문인 것으로 분석된다. 반면 본 연구에서 제시한 신규모형의 경우 신호 연동을 고려함과 동시에 모든 방향에서의 지체도를 최소화하도록 현시를 할당하여 비 연동방향의 지체도 및 연동성의 저하를 최소화 하는 방향으로 특정 연동방향의 교통흐름을 향상시켰기 때문인 것으로 분석된다.

## 4. 다수 교차로 확장 적용 및 연동규모 변화에 따른 효과비교

### 1) 다수 교차로에 적용 가능한 확장 방법론

앞에서 제시한 방법론은 2개 교차로에 적용가능한 방법론으로 실제 다수 교차로에서 적용하기 위해서는 추가적인 검토가 필요하다. 이에 본 절에서는 다수 교차로에 적용한 확장 방법론에 대해 논의하고자 한다.

본 방법론은 교차로 주기 시작시마다 반복적으로 실행된다는 특징이 있다. 이로 인해 2개의 교차로를 연동할 때에는 두 교차로의 주기 시작 순서대로 번갈아 실행함으로써 예시를 통해 쉽게 설명이 가능하다. 하지만, 3개 이상의 교차로에서는 교차로 주기 시작 순서가 교통상황에 따라 매번 달라지기 때문에 앞에서 설명한 방법과 같이 예를 들어 설명하기가 어렵다. 따라서 본 방법론을 다수의 교차로에 적용하기 위해서는 다양한 규모에 적용할 수 있게 일반화한 확장방법론이 필요하다.

다수교차로에 적용 가능한 확장방법론을 구축하기 위해 3장에서 설명한 시간 흐름에 따른 4단계( $t_1, t_2, t_3, t_4$ ) 방법론을 큰 흐름에서 살펴보면 <그림 32>와 같이 교차로 연동 순서에 따라 첫 번째 교차로 주기 시작 시점( $t_1, t_3$ )과 두 번째 교차로 주기 시작시점( $t_2, t_4$ )으로 구분할 수 있다. 다시 말해 연동 첫 번째 교차로인지 혹은 연동 중간 교차로인지에 따라 주기 및 현시시간을 최적화 하는 방법이 달라진다.

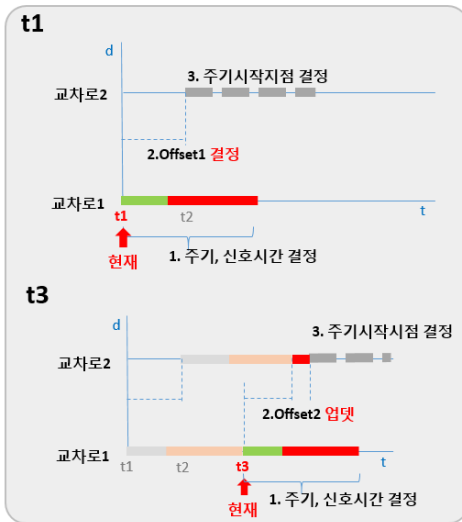
먼저 연동 첫 번째 교차로의 주기 시작 시에는 주기길이와 현시시간을 유전자알고리즘을 이용해 동시에 최적화한 후 다음 교차로의 주기시작시점 결정을 위해 해당주기의 연동값(offset)을 결정한다. 만약 사전에 미리 예측한 해당주기의 연동값이 존재한다면 현재 재계산한 연동값을 이용하여 연동값 보정 및 최종 결정한다.

반면, 연동 중간 교차로의 주기 시작 시에는 주기길이를 결정하기 위해 먼저 상류(이전) 교차로와의 대기행렬길이를 이용해 연동값을 예측

하고 이 값을 통해 해당 교차로의 주기길이를 결정한다. 그 후 정해진 주기길이 안에서 유전자 알고리즘을 이용하여 현시시간만 최적화한다.

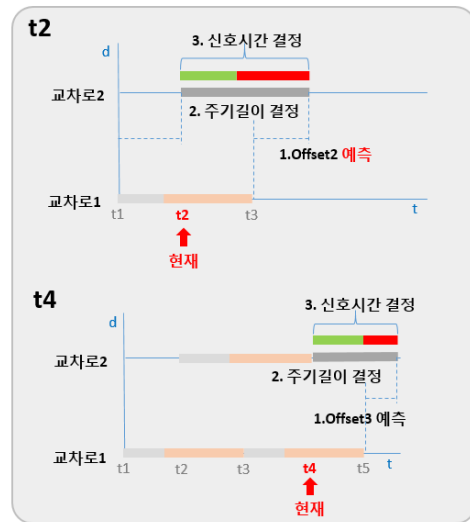
#### 교차로 1 주기시작시점 (첫 교차로 주기시작)

- 주기길이, 신호시간을 동시에 최적화
- 다음 교차로의 주기시작시점 결정을 위해 Offset 결정 및 업데이트



#### 교차로 2 주기시작시점 (중간 교차로 주기시작)

- 이전 교차로와 Offset 예측으로 주기길이 산정
- 신호시간만 최적화



<그림 32> 시간흐름에 따른 4단계 방법론 구분

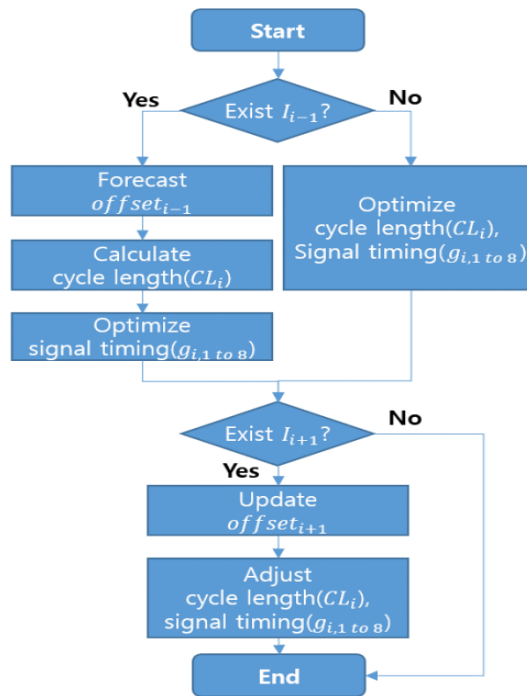
이러한 특징을 이용해 다수의 교차로에 적용할 수 있도록 일반화한 방법론을 순서도로 나타내면 <그림 33>과 같다. 본 확장 방법론은 각 교차로에서 신호 주기 시작 시 마다 반복 수행 된다.  $i$  번째 교차로의 주기 시작시를 예를 들어 단계별로 설명하면 다음과 같다.

(1) 먼저 현 교차로( $I_i$  :  $i$  번째 교차로)의 상류 교차로( $I_{i-1}$  :  $i-1$  번째 교차로)가 있는지 확인한다. 만약 상류 교차로가 존재한다면, (1-1) 상류 교차로와의 연동값( $offset_{i-1}$ )을 예측한다. 그 후 (1-2) 현 교차로의 주기길이를 계산하여 결정한다. 마지막으로 (1-3) 현 교차로의 신호시간을 최적화한다. 만약 상류 교차로가 존재하지 않는다면, 즉, 현 교차로가 연동 첫 번째 교차로라면, (1-1) 현 교차로의 주기길이 및 신호시간을

유전자 알고리즘을 이용하여 동시에 최적화 한다.

(2) 둘째, 현 교차로( $I_i : i$  번째 교차로)의 하류 교차로( $I_{i+1} : i+1$  번째 교차로)가 있는지 확인한다. 만약 하류 교차로가 존재한다면, (2-1) 하류 교차로와의 연동값( $offset_{i+1}$ )을 갱신한다. 연동값 갱신 시 기존의 예측한 연동값과 차이가 크면 예측한 연동값으로 산정한 하류 교차로의 신호 주기길이에 변경이 필요하게 된다. 이를 위해, (2-2) 연동값 갱신에 따른 하류 교차로의 주기시간 및 신호시간을 재조정 한다. 만약 하류 교차로가 존재하지 않는다면 별다른 작업을 수행하지 않고 해당 주기의 프로세스를 종료한다.

(3) 지금까지 프로세스를 통해 얻은 주기길이 및 현시길이 정보를 바탕으로 교차로 신호제어를 수행하고 다음 교차로 신호 주기가 시작될 때 (1) 단계로 되돌아가 반복 수행한다.



<그림 33> 다수 교차로에 적용 가능한 일반화 방법론 순서도

## 2) 연동규모 변화에 따른 연동효과 분석

본 절에서는 본 방법론이 소규모 네트워크뿐만 아니라 다수의 교차로로 이루어진 네트워크에서도 확장 적용 가능한지 살펴보기 위해 다수 교차로에서 신호 연동시의 효과를 분석하고, 더 나아가 다양한 연동규모(연동 교차로수)에서의 연동효과를 비교 분석하여 주어진 시나리오에서 신호 연동 시 최대 효과를 발휘 할 수 있는 교차로 연동규모를 검토해 보고자 한다.

먼저 다수 교차로로 이루어진 네트워크 규모를 결정하기 위해 평일 오전 첨두시 동안 특정 방향의 교통량이 두드러진 지점의 도로축(Corridors)을 살펴본 결과, <표 26>과 같이 평균 6개의 교차로를 지닌 것으로 분석되었다. 따라서 분석 대상 네트워크는 6개의 교차로로 구성하였으며, 그 이외의 조건은 소규모 네트워크 분석 시와 동일하게 설정하였다.

다만, 주어진 시나리오에서 최대 연동 효과가 있는 연동 규모를 찾아보기 위해, 교차로 2개씩 연동할 때(이하 모형2-2-2), 교차로 3개씩 연동할 때(이하 모형3-3), 교차로 4개/2개씩 연동할 때(이하 모형4-2), 교차로 6개 모두 연동할 때(이하 모형6)와 같이 연동 규모에 변화를 주어 분석하였다. 각 시나리오 별로 30분 동안 시뮬레이션 분석을 실시하였으며, 소규모 네트워크 분석 시와 동일하게 각 시나리오별 30번씩 반복 수행하였다.

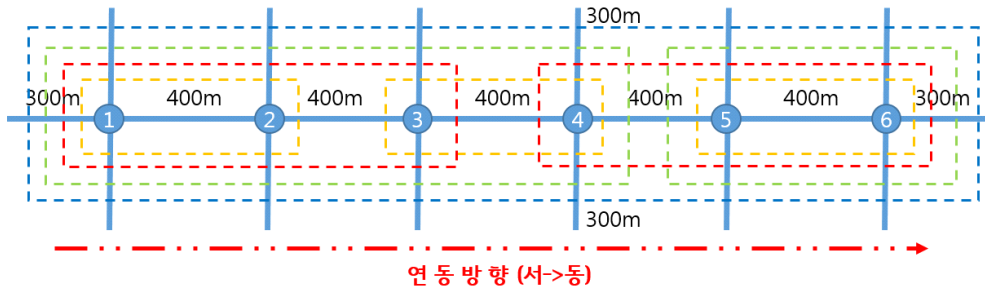
<표 26> 비대칭 교통상황 발생 지점에 속한 도로축의 교차로수

지점명	도로축	연장(km)	교차로수*
구기터널	진흥로	5.1	6
자하문터널	자하문로	3.2	5
남산3호 터널	녹사평대로	4.3	6
신당(성동여상)	을지로	2.7	10
미아리고개	동소문로	3.3	5
평균		3.7	6

\* : 주도로와 부도로 모두 신호등이 설치된 신호교차로의 수

출처 : 서울특별시 교통운영과, 2013년 서울시 지점별 교통량, <http://traffic.seoul.go.kr>, 2014





<그림 34> 분석 대상 네트워크 (6개 교차로)

모형별 시나리오별 반복실행(30번)에 따른 평가척도를 살펴보면 <표 27>~<표 30>과 같다. 신호 연동방향의 지체도(평균지체시간)를 살펴보면 교차로 6개 모두 연동시켰을 때(모형6) 효과가 가장 높은 것으로 분석되었으며, 그 다음으로 모형4-2, 모형3-3, 기존연동모형, 모형2-2-2, 기존모형 순으로 분석되었다. 하지만 모형6과 모형4-2, 모형3-3은 차이가 미미하고 모형4-2의 경우 최솟값으로 본다면 근소한 차이지만 가장 낮게 분석되었으므로 신호 연동방향의 지체도 결과만 가지고 6모형이 가장 좋다고 판단하는 것은 옳지 않다. 하지만 본 방법론을 적용한 모형은 평균, 최소, 최댓값기준에서 전반적으로 기존모형보다 지체도를 향상시킨다는 것을 확인할 수 있으며, 신호 연동 단절이 적을수록 지체도 향상정도가 크다는 것을 확인할 수 있다. 두 번의 연동단절이 존재하는 모형2-2-2는 한 번 이하의 연동단절이 발생하는 모형3-3, 모형4-2, 모형6에 비해 지체도가 전반적으로 높게 나타났다.

신호 연동방향의 연동성(평균정지횟수) 또한 지체도와 동일한 결과를 보였다. 연동방향의 연동성 측면에서도 교차로 6개를 모두 연동시킨 모형6이 가장 좋게 분석되었으며, 신호 연동 단절이 적은 모형3-3, 모형4-2, 모형6이 상대적으로 연동 단절이 많은 모형2-2-2 보다 연동성 측면에서 좋게 분석되었다.

전체 네트워크 측면에서의 지체도를 살펴보면 모형6이 평균값, 최솟값, 최댓값 모두 가장 낮은 것으로 분석되었으며, 연동성 측면에서도 모

형6이 가장 낮은 것으로 분석되었다. 기존연동모형은 앞에서 살펴본 바와 같이 전체 네트워크 측면에서의 지체도와 연동성은 기존모형에 비해 매우 나빠진 것으로 분석되었다.

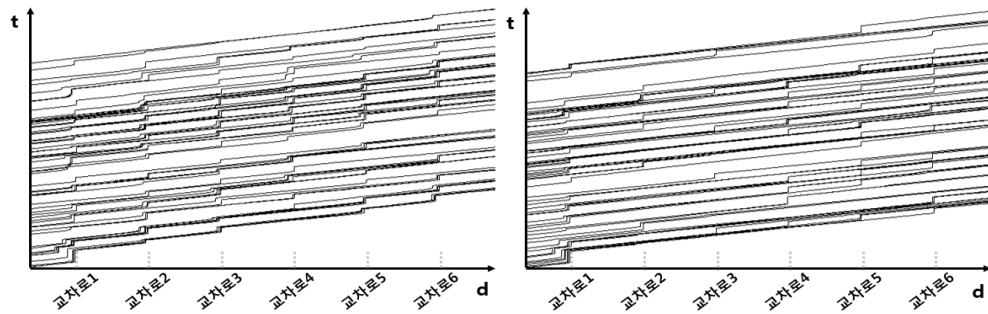
이러한 평가척도값의 차이가 통계적으로 유의미한지 확인하기 위해 통계분석을 추가적으로 수행하였다. 앞에서 분석한 것과 같이 데이터의 정규성과 등분산성 가정의 만족여부에 따라 독립표본 t-검정 및 Welch's t-검정(Welch-Aspin검정), Mann-Whitney U 검정을 수행하였다(<부록 1>~<부록 12> 참조). 그 결과 연동방향의 지체도 및 연동성, 전체 네트워크의 연동성 측면에서 신규모형(모형6)은 기존모형 및 기존연동모형에 비해 더 나은 성능을 보여준다는 것(평가척도의 차이가 통계적으로 유의함)을 확인하였다. 다만 전체 네트워크의 지체도 측면에서 신규모형과 기존모형의 지체도는 비슷한 것(평가척도의 차이가 통계적으로 유의하지 않음)으로 분석되었다.

참고로 신호 연동방향의 평균지체도와 전체 네트워크 측면에서의 평균지체도를 비교해보면 신호 연동방향의 지체도가 네트워크 측면에서의 지체도보다 오히려 더 큰데, 이는 네트워크 구조상 신호 연동방향 이동류는 6개 교차로로 이루어진 주도로(동서방향)를 가로질러 총 이동연장이 긴 것에 비해 비 연동방향 이동류는 1개 교차로로 이루어진 부도로(남북방향)를 통과하여 이동연장이 짧기 때문이다. 따라서 신호 연동방향의 평균지체도는 전체 네트워크 측면의 값보다 크게 산정된다.

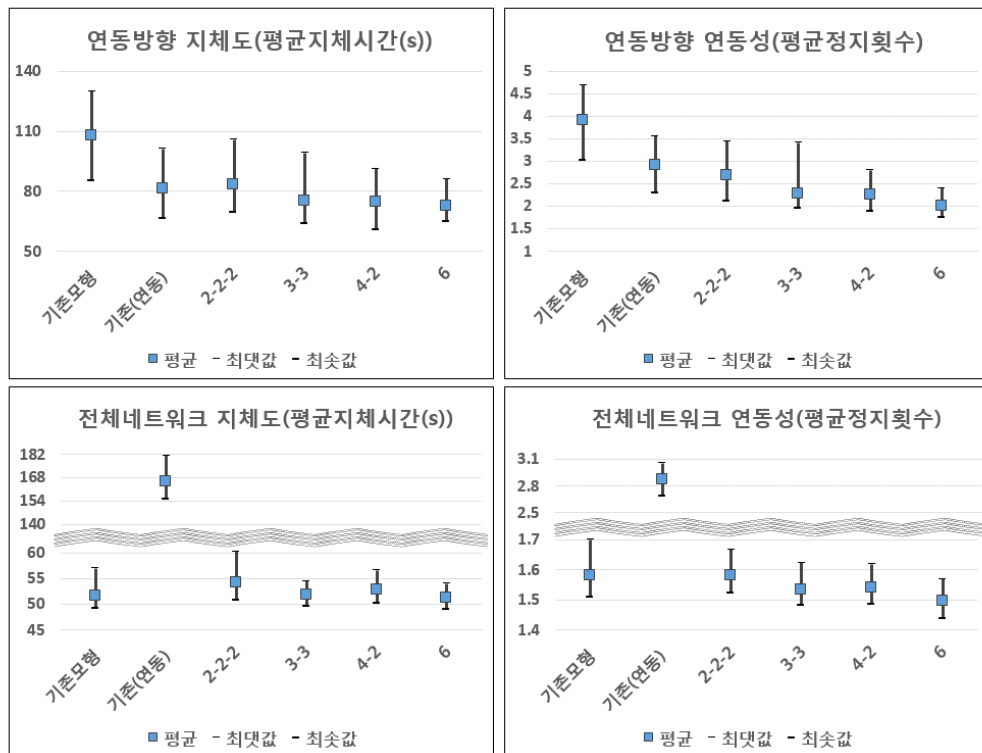
종합해보면, 교차로 6개를 모두 연동시킨 모형6이 지체도와 연동성 측면에서 모두 높은 퍼포먼스를 보이는 것으로 나타났다. 모형6은 기존연동모형 대비 비 연동방향의 교통상황 악화를 최소화하며 연동방향의 지체도 및 연동성을 약 33%, 약 49% 향상시켜 주는 것으로 나타났다. 또한 이러한 차이는 통계적으로 유의한 것으로 나타난다.

기존모형 대비 연동성 향상을 보다 가시적으로 확인하기 위해 주도로를 통과하는 차량들의 궤적을 시공도로 나타내면 <그림 35>와 같다.

그림에서 첫 번째 교차로는 신호 연동에 영향을 받지 않아 많은 차들이 정차하고 있지만 신호 연동된 두 번째 이후 교차로부터는 정차하는 차량의 수가 기존 모형에 비해 많이 줄어든 것을 확인 할 수 있다.



<그림 35> 주도로를 통과하는 차량들의 궤적(시공도), (교차로6개)



<그림 36> 모형별 평가척도 (교차로 6개)

<표 27> 모형별 신호 연동방향의 지체도 비교 (교차로 6개)

	기존모형 (A)	기존연동 (B)	증감률 ( $\frac{B-A}{A}$ )	신규모형				증감률 ( $\frac{C-A}{A}$ )
				2-2-2	3-3	4-2	6(C)	
평균	108.09	81.39	<b>-25%*</b>	83.32	74.93	74.79	<b>72.51</b>	<b>-33%*</b>
최대값	130.10	101.40	-22%	105.90	99.30	91.40	<b>86.30</b>	-34%
최소값	85.20	66.30	-22%	69.40	63.80	<b>60.70</b>	65.00	-24%

주) 신호 연동방향 지체도는 주도로(서->동)를 통과하는 차량들의 평균 지체시간을 의미.

\* : 기존모형의 평가척도값 대비 통계적으로 차이가 유의미함.

<표 28> 모형별 신호 연동방향의 연동성 비교 (교차로 6개)

	기존모형 (A)	기존연동 (B)	증감률 ( $\frac{B-A}{A}$ )	신규모형				증감률 ( $\frac{C-A}{A}$ )
				2-2-2	3-3	4-2	6(C)	
평균	3.92	2.92	<b>-26%*</b>	2.68	2.29	2.26	<b>2.00</b>	<b>-49%*</b>
최대값	4.70	3.57	-24%	3.45	3.42	2.80	<b>2.41</b>	-49%
최소값	3.02	2.30	-24%	2.12	1.96	1.88	<b>1.76</b>	-42%

주) 신호 연동방향 연동성은 주도로(서->동)를 통과하는 차량들의 평균 정지횟수를 의미.

\* : 기존모형의 평가척도값 대비 통계적으로 차이가 유의미함.

<표 29> 모형별 네트워크의 지체도 비교 (교차로 6개)

	기존모형 (A)	기존연동 (B)	증감률 ( $\frac{B-A}{A}$ )	신규모형				증감률 ( $\frac{C-A}{A}$ )
				2-2-2	3-3	4-2	6(C)	
평균	51.69	165.66	<b>221%*</b>	54.11	51.76	52.70	<b>51.15</b>	-1%
최대값	57.05	181.54	218%	60.30	54.56	56.61	<b>54.07</b>	-5%
최소값	49.14	154.98	215%	50.76	49.69	50.11	<b>49.05</b>	0%

주) 네트워크 지체도는 모든 차량들의 평균 지체시간을 의미.

\* : 기존모형의 평가척도값 대비 통계적으로 차이가 유의미함.

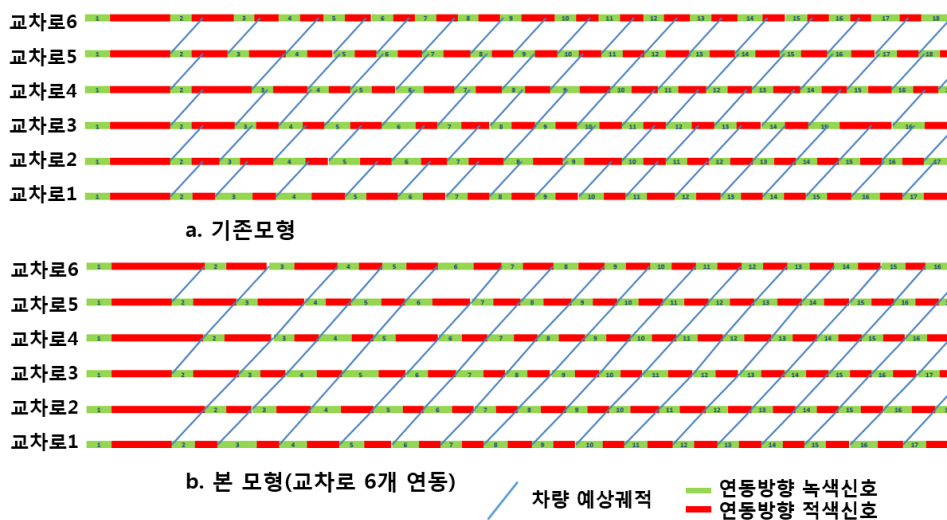
<표 30> 모형별 네트워크의 연동성 비교 (교차로 6개)

	기존모형 (A)	기존연동 (B)	증감률 ( $\frac{B-A}{A}$ )	신규모형				증감률 ( $\frac{C-A}{A}$ )
				2-2-2	3-3	4-2	6(C)	
평균	1.58	2.87	<b>82%*</b>	1.58	1.53	1.54	<b>1.50</b>	<b>-5%*</b>
최대값	1.70	3.06	80%	1.67	1.63	1.62	<b>1.57</b>	-8%
최소값	1.51	2.69	78%	1.52	1.48	1.49	<b>1.44</b>	-5%

주) 네트워크 연동성은 모든 차량들의 평균 정지횟수를 의미.

\* : 기존모형의 평가척도값 대비 통계적으로 차이가 유의미함.

신규모형의 경우 본 연구에서 제시한 방법론대로 잘 적용되어 정상적으로 신호 연동되었는지 신호 연동정도를 살펴보기 위해, 교차로별 연동방향 신호운영현황을 <그림 37>과 같이 시공도로 나타내었다. 이 그림은 교차로별 연동방향의 녹색신호길이와 적색신호길이를 나타내주어 교차로 간 신호 연동정도를 확인해 볼 수 있다. 앞에서 살펴본 바와 같이 기존모형의 경우 연동값(교차로 간 녹색신호 시작 시점 차이)을 고려하지 않으므로 연동이 크게 어긋나는 경우가 자주 발생한다. 반면 연동성을 고려한 신규모형(모형6)의 경우 두 번째 주기부터 교차로 간 상황에 따라 연동값을 고려하여 주기길이 및 현시시간을 실시간으로 늘리거나 줄여 연동을 맞춰나가는 것을 확인 할 수 있다.



<그림 37> 모형별 연동방향 신호현황(시공도), (교차로 6개)

## 5. 양방향 대칭/비대칭 교통량을 지닌 네트워크에서의 효과비교

지금까지 이루어진 분석은 모두 주도로의 양방향 비대칭 교통량을 지닌 네트워크에서 이루어 졌다. 한 방향의 신호 연동이 필요한 경우는 일반적으로 비대칭 교통량을 지닌 네트워크에서 발생하기 때문이다. 하지만 본 절에서는 양방향 대칭적인 교통량을 지닌 네트워크에서의 분석을 통해 대칭적인 교통상황을 지닌 네트워크에 본 방법론을 적용했을 때 비대칭 교통상황을 지닌 네트워크 대비 어떠한 차이가 발생하는지 분석하였다.

분석 대상 네트워크는 앞 절과 동일하게 6개의 교차로로 구성된 네트워크를 사용하였다. 주도로의 서->동 방향을 연동제어 한다고 가정하며, 기타 조건은 앞 절의 분석과 동일하다. 단, 주도로의 교통량은 서->동방향, 동->서방향 모두 1500대/시로 동일하다는 점에서 차이가 있다.

각 모형별 평가척도를 살펴보면 <표 34>~<표 37>과 같다. 연동성 측면에서는 신호 연동방향 및 전체네트워크 모두 교차로 6개를 연동시켰을 때(모형6) 효과가 가장 높은 것으로 분석되었으나, 지체도 측면에서는 미미한 차이지만 교차로 3개씩 연동시킨 모형(모형3-3)이 6개씩 묶은 모형(모형6) 보다 미미하지만 더 좋게 나타났다. 하지만 지체도의 차이는 <표 33>과 같이 통계적으로 유의하지 않는 것으로 분석되었다.(기존모형과 신규모형(모형6)의 평가척도별 통계적 차이는 <부록 13>~<부록 27> 참조)

이렇게 연동성과 지체도 측면에서 상이한 결과가 나온 이유는 모형 3-3이 모형6에 비해 신호 연동단절이 존재하여 연동성은 다소 떨어지지만 중간교차로(3번째 교차로)에서 해당 교차로의 교통상황에 따른 주기길이 최적화를 한 번 더 수행함으로써 차량의 지체도를 향상시켰기 때문인 것으로 추정된다. 또한 비대칭 교통상황 대비 비 연동방향(동->서)의 교통량이 비약적으로 증가함으로써 각 교차로 간 교통상황 차이는 더욱 심화되어, 중간교차로 주기길이 최적에 따른 모형3-3의 지체도 향상효과가 비대칭 교통량 네트워크 대비 크게 향상되었기 때문인 것으로 추정된다.

<표 31> 연동방향 지체도의 정규성 검정 결과 (모형3-3, 모형6)

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
신규모형(3-3)	.115	30	.200	.940	30	.092*
신규모형	.147	30	.097	.947	30	.139*
a : Lilliefors 유의확률 수정				* : p > 0.05		

<표 32> 연동방향 지체도 등분산성 검정 결과 (모형3-3, 모형6)

비교모형	Levene의 등분산 검정	
	F	Sig.
신규모형(3-3)-신규모형(6)	.926	.340*

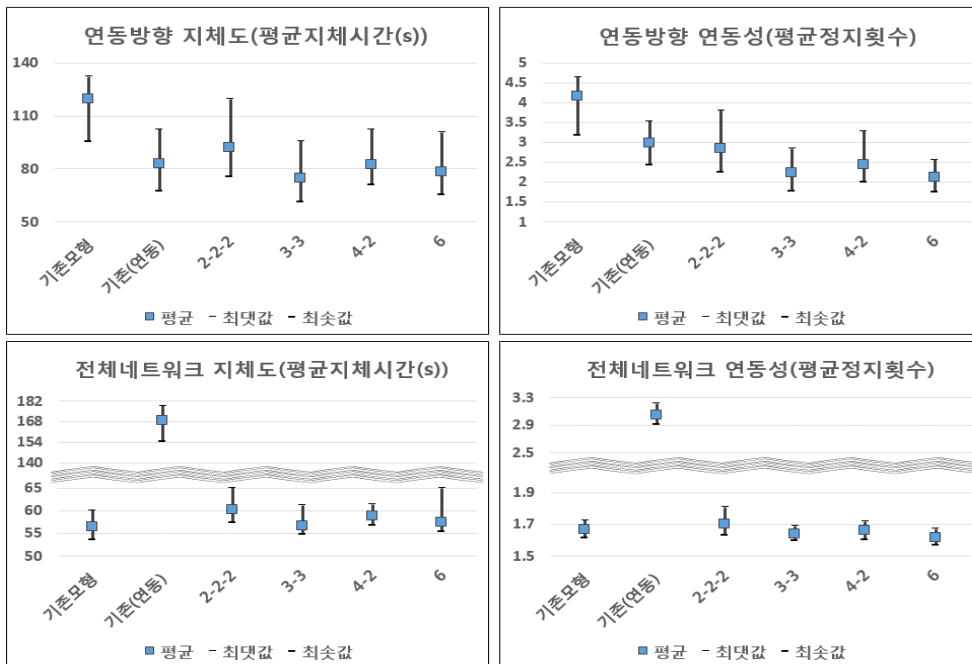
---

\* :  $p > 0.05$

〈표 33〉 연동방향 지체도의 t-검정 결과 (모형3-3, 모형6)

비교모형	독립표본 t-검정			
	가정	t	df	Sig.
기존연동모형-신규모형	등분산성	-1.630	58	.108*

\* :  $p > 0.05$



<그림 38> 모형별 평가척도 (양방향 대칭 교통상황)

<표 34> 모형별 신호 연동방향의 지체도 비교 (양방향 대칭 교통상황)

	기존모형 (A)	기존연동 (B)	증감률 ( $\frac{B-A}{A}$ )	신규모형				증감률 ( $\frac{C-A}{A}$ )
				2-2-2	3-3	4-2	6(C)	
평균	119.58	82.67	<b>-31%*</b>	91.78	<b>74.76</b>	82.18	78.43	<b>-34%*</b>
최대값	132.40	102.50	-23%	119.70	<b>96.00</b>	102.60	100.90	-24%
최소값	95.70	67.50	-29%	75.50	<b>61.10</b>	70.80	65.40	-32%

주) 신호 연동방향 지체도는 주도로(서->동)를 통과하는 차량들의 평균 지체시간을 의미.

\* : 기존모형의 평가척도값 대비 통계적으로 차이가 유의미함.

<표 35> 모형별 신호 연동방향의 연동성 비교 (양방향 대칭 교통상황)

	기존모형 (A)	기존연동 (B)	증감률 ( $\frac{B-A}{A}$ )	신규모형				증감률 ( $\frac{C-A}{A}$ )
				2-2-2	3-3	4-2	6(C)	
평균	4.16	2.98	<b>-28%*</b>	2.84	2.23	2.43	<b>2.12</b>	<b>-49%*</b>
최대값	4.66	3.54	-24%	3.82	2.85	3.29	<b>2.57</b>	-45%
최소값	3.19	2.43	-24%	2.25	1.78	2.00	<b>1.76</b>	-45%

주) 신호 연동방향 연동성은 주도로(서->동)를 통과하는 차량들의 평균 정지횟수를 의미.

\* : 기존모형의 평가척도값 대비 통계적으로 차이가 유의미함.

<표 36> 모형별 네트워크의 지체도 비교 (양방향 대칭 교통상황)

	기존모형 (A)	기존연동 (B)	증감률 ( $\frac{B-A}{A}$ )	신규모형				증감률 ( $\frac{C-A}{A}$ )
				2-2-2	3-3	4-2	6(C)	
평균	56.34	168.93	<b>200%*</b>	60.25	<b>56.65</b>	58.83	57.38	<b>2%*</b>
최대값	60.10	178.94	198%	65.12	<b>61.23</b>	61.44	64.97	8%
최소값	53.68	154.73	188%	57.34	<b>54.79</b>	56.82	55.46	3%

주) 네트워크 지체도는 모든 차량들의 평균 지체시간을 의미.

\* : 기존모형의 평가척도값 대비 통계적으로 차이가 유의미함.

<표 37> 모형별 네트워크의 연동성 비교 (양방향 대칭 교통상황)

	기존모형 (A)	기존연동 (B)	증감률 ( $\frac{B-A}{A}$ )	신규모형				증감률 ( $\frac{C-A}{A}$ )
				2-2-2	3-3	4-2	6(C)	
평균	1.67	3.05	<b>83%*</b>	1.70	1.64	1.66	<b>1.61</b>	<b>-3%*</b>
최대값	1.73	3.22	87%	1.81	1.69	1.72	<b>1.67</b>	-3%
최소값	1.62	2.92	81%	1.63	1.60	1.61	<b>1.57</b>	-3%

주) 네트워크 연동성은 모든 차량들의 평균 정지횟수를 의미.

\* : 기존모형의 평가척도값 대비 통계적으로 차이가 유의미함.



앞 절에서 분석한 비대칭 교통상황에서의 기존모형 및 모형6의 평가 지표 결과와 본 절에서 분석한 대칭 교통상황에서의 기존모형 및 모형6의 평가지표 결과를 비교해보면, 기존모형의 지체도(평균지체시간)는 약 9~11%, 연동성(평균정지횟수)은 약 6% 정도 증가한 것으로 나타났으며, 신규모형의 경우 지체도(평균지체시간)는 약 8~12%, 연동성(평균정지횟수)은 약 6~7% 정도 증가 한 것으로 나타났다.

연동방향의 지체도 및 연동성 향상효과는 비대칭 교통량을 지닌 네트워크에서 33%, 49%, 대칭 교통상황에서는 34%, 49%로 효과가 미미하게나마 증가하는 것으로 나타났지만, 전체 네트워크 측면에서의 지체도 및 연동성 향상효과는 비대칭 교통상황에서 1%, 5%, 대칭 교통상황에서는 -2%, 4%로 지체도 및 연동성의 개선효과는 오히려 줄어든 것으로 분석되었다. 이것은 교통량이 양방향 대칭인 교통상황보다 비대칭 교통량을 지닌 교통상황에서 신호 연동을 실시할 때 상대적으로 더 나은 효과를 얻을 수 있다는 것을 간접적으로 보여준다.

<표 38> 대칭/비대칭 교통상황별 평가지표 비교

평가척도		기존모형			신규모형(모형6)			신규모형 효과	
		비대칭	대칭	증감률	비대칭	대칭	증감률	비대칭	대칭
연동방향	지체도(s)	108.09	119.58	11%	72.51	78.43	8%	33%*	34%*
	연동성(회)	3.92	4.16	6%	2.00	2.12	6%	49%*	49%*
네트워크	지체도(s)	51.69	56.34	9%	51.15	57.38	12%	1%	-2%*
	연동성(회)	1.58	1.67	6%	1.50	1.61	7%	5%*	4%*

주) 평가척도는 평균값 기준

\* : 기존모형의 평가척도값 대비 통계적으로 차이가 유의미함.

## V. 결론 및 향후 연구과제

### 1. 결론

본 연구에서는 주기변동기반 신호최적화의 단점이라고 할 수 있는 특정방향의 연동성을 고려할 수 있는 방법론을 개발하였다. 또한 신호 연동 고려 시 대기행렬 길이 예측에 따른 연동값 산정오차를 최소화하기 위해서 예측값과 실측값의 오차정보를 이용하여 실시간으로 신호 연동값을 보정할 수 있는 방법론을 모형에 적용하여 연동성을 향상시켰다.

본 연구에서 제시한 방법론의 성능평가를 위해 크게 세 가지 모형 분석을 실시하였다.

첫째, 모형의 연동 효과를 살펴보기 위해 2개 교차로로 이루어진 소규모 네트워크에서 기존의 주기변동기반 신호제어모형과 평가척도 비교, 검토하였다. 기존의 주기변동 신호제어모형을 ‘신호 연동을 고려하지 않은 기존의 주기변동기반 모형(이하 기존모형)’과 ‘목적함수 수정을 통해 특정방향의 신호 연동을 고려한 기존의 주기변동기반 모형(이하 기존연동모형)’으로 나누고, 본 연구에서 제시한 새로운 주기변동기반 모형(이하 신규모형)과 비교하였다. 그 결과, 기존연동모형은 기존모형에 비해 연동방향의 지체도 및 연동성이 각각 22%, 29% 향상되지만, 전체 네트워크 측면의 지체도 및 연동성은 각각 254%, 92%로 크게 저하되는 것으로 분석되었다. 반면 신규모형은 기존모형에 비해 연동방향의 지체도 및 연동성이 각각 23%, 32% 향상되며, 전체 네트워크 측면의 지체도는 약 1% 정도 저하, 연동성은 약 2% 향상되는 것으로 분석되었다. 다만, 전체 네트워크 지체도의 차이는 통계적으로 유의하지 않다는 것을 고려한다면, 신규모형은 기존연동모형과 달리 전체 네트워크 측면에서 지체도 및 연동성의 저하 없이 연동방향의 연동성을 크게 향상시킬 수 있다고 해석할 수 있다.

둘째, 본 방법론이 소규모 네트워크뿐만 아니라 다수의 교차로로 이루어진 네트워크에서도 확장 적용 가능한지 살펴보기 위해 다수 교차로를 대상으로 다양한 연동규모(연동교차로 수)의 신호 연동을 실시하여 효과를 비교 분석하였다. 6개 교차로로 이루어진 네트워크를 대상으로 교차로를 2개씩, 3개씩, 4개/2개씩, 6개씩 묶어 연동시킨 결과, 6개 교차로 모두 연동시킨 모형(이하 모형6)이 연동방향 혹은 전체 네트워크 측면에서 가장 높은 퍼포먼스를 보이는 것으로 나타났다. 이때, 기존연동모형은 기존모형에 비해 연동방향의 지체도 및 연동성이 각각 25%, 26% 향상되지만, 전체 네트워크 측면에서의 지체도 및 연동성은 각각 221%, 82%로 크게 저하되는 것으로 분석되었다. 반면 신규모형(모형6)은 기존모형에 비해 연동방향의 지체도 및 연동성이 각각 33%, 49% 향상되며, 전체 네트워크 측면의 지체도 및 연동성은 각각 1%, 5% 향상되는 것으로 분석되었다. 또한 이러한 평가척도의 차이가 통계적으로 유의한지 추가적으로 통계분석을 실시한 결과, 신규모형(모형6)의 네트워크 지체도를 제외한 나머지 평가척도의 차이는 유의한 것으로 분석되었다. 따라서 신규모형(모형6)은 기존연동모형과 달리 전체 네트워크 측면에서 지체도 및 연동성의 저하 없이 연동방향의 연동성을 크게 향상 시킬 수 있다고 해석할 수 있으며, 이러한 결과는 소규모 네트워크 분석 시 신규모형의 분석결과와 맥락을 같이 한다.

마지막으로 지금까지의 비대칭 교통량을 지닌 네트워크를 대상으로 분석한 것과 달리 양방향 대칭 교통량을 지닌 네트워크에서의 효과를 비교 분석하였다. 그 결과, 연동성 측면에서는 교차로 6개를 연동시켰을 때(모형6) 효과가 가장 높은 것으로 분석되었으며, 지체도 측면에서는 미미한 차이지만 교차로 3개씩 연동시킨 모형(모형3-3)이 6개씩 묶은 모형(모형6) 보다 좋게 분석되었다. 하지만 모형3-3과 모형6의 지체도 차이는 통계적으로 유의하지 않다는 것을 고려한다면 비대칭 교통량 네트워크 분석과 동일하게 연동성이 우수한 모형6이 가장 좋은 효과를 보여준다고 볼 수 있다.

비대칭 교통량 네트워크 대비 대칭 교통량 네트워크의 신규모형의 지체도 및 연동성 향상효과를 살펴보면, 연동방향의 경우 비대칭 교통량을 지닌 네트워크에서 33%, 49%, 대칭 교통상황에서는 34%, 49%로 효과가 미미하게나마 증가하는 것으로 나타났지만, 전체 네트워크 측면에서는 비대칭 교통상황에서 1%, 5%, 대칭 교통상황에서는 - 2%, 4%로 지체도 및 연동성의 개선효과는 오히려 줄어든 것으로 분석되었다. 이것은 교통량이 양방향 대칭인 교통상황보다 비대칭 교통량을 지닌 교통상황에서 신호 연동을 실시할 때 상대적으로 더 나은 효과를 얻을 수 있다는 것을 시사한다.

종합해보면, 본 연구에서 제시한 방법론은 기존모형 대비 전체 네트워크의 지체도 및 연동성 저하 없이 연동방향의 연동성을 크게 향상시키며, 주도로 통행량이 양방향 대칭인 교통상황보다 비대칭 교통량을 지닌 교통상황에서 신호 연동을 실시할 때 상대적으로 더 나은 효과를 얻을 수 있다.

## 2. 연구의 한계 및 향후 연구과제

본 연구는 다음과 같은 측면에서 한계점을 지니고 있다.

첫째, 본 방법론에서는 신호 연동을 고려하기 위해 연동값(offset) 산정 시 교차로 간 대기열 길이에 대한 예측을 실시한다. 이 예측값은 신규모형의 연동성을 좌우하는 중요한 변수가 되므로, 좀 더 나은 성능을 위해서는 좀 더 정확한 대기열 길이 예측 방법론이 필요하다. 예측오차를 최소화하기 위해 본 연구에서는 대기행렬 길이 예측값과 이후 실제 측정된 실측값과 비교를 통해 얻은 오차정보를 이용해 실시간으로 현시시간 또는 연동값(offset)을 갱신하는 등 피드백 과정을 통해 신호 및 연동값 보정을 실시한다. 하지만 차이가 상대적으로 커 보정 허용범위를 넘어설 경우에는 실시간으로 현시시간을 보정하는데 한계가 발생하여 신

규모형의 연동성을 저하시키는 주원인이 된다. 따라서 신규모형에서 신호 연동효과를 증대시키기 위해서는 무엇보다 대기행렬 예측모형의 정확성이 중요하다.

대기행렬 예측모형의 정확성을 높이기 위한 예로 이전 단계에서 예측한 대기열 길이와 현재 단계에서 측정한 대기열 길이의 차이정보를 단순 현시시간 보정방법이 아닌 대기행렬 예측모형에서 활용한다면, 다음 단계의 대기열 예측 시 오차를 최소화 하며, 현시시간 보정 부담 역시 감소시킬 수 있을 것으로 생각된다.

둘째, 본 방법론은 교통량이 많은 주도로의 한쪽방향의 연동만을 고려하고 있으나 향후에는 주도로의 양방향을 고려할 수 있는 신호 연동 방법론에 대한 검토가 필요하다.

셋째, 신규모형 분석 시 네트워크 교통상황은 교차로 혹은 시간에 따라 일정하다는 가정 하에 분석을 실시하였다. 향후에는 시간단위별로 유입/유출교통량이 다양하게 변화하는 동적 교통상황이나, 교차로 마다 유입/유출 교통량이 다른 부도로가 존재하는 상황에서 신호 연동 규모에 따라 어떤 퍼포먼스 차이를 보일지 추가적인 분석이 필요하다.

마지막으로 본 연구에서는 양방향 대칭 교통량 네트워크 대비 약 53%의 비대칭 교통량 네트워크에서 본 방법론 적용 시 더 나은 효과를 얻을 수 있다는 것을 확인하였다. 향후연구에서는 교통량 비대칭 정도에 따른 평가척도 향상효과의 민감도 분석이 필요할 것으로 생각된다.

## ■ 참고문헌

국토해양부(2013), 「도로용량편람」.

기병국 · 한종학 · 김성호(2002), “신경망 이론과 유전자 알고리즘을 결합한 신호교차로 대기행렬 예측기법에 관한 연구”, 「대한토목학회논문집」, 22(4): 595-606.

서울지방경찰청 교통지도부(2002), 「실시간 신호제어시스템 실무해설집」.

서울특별시 교통운영과, 2013년 서울시 지점별 교통량, <http://traffic.seoul.go.kr/>, 2014  
심소정 · 이청원 · 최기주(2002), “Kalman Filter를 활용한 대기행렬예측 알고리즘 개발”, 「대한교통학회지」 20(5): 145-152.

윤경섭(1998), “대기차량 최소화를 위한 동적 교통신호 연동모델”, 대한교통학회 제34회 추계학술발표회.

이영인 · 임재승 · 윤경섭(2000), “대기차량 최소화를 위한 주기변동기반 (Cycle-free based) 동적 신호시간 결정모형 개발”, 「대한교통학회지」, 18(2): 73-89.

이영인 · 최완석 · 임재승(2001), “지체도 최소화를 위한 주기변동기반 동적 신호시간 결정모형 개발”, 「대한교통학회지」, 19(1): 115-129.

임현철(2005), “차량군 분산모형을 적용한 주기변동시간 신호시간 결정모형 개발”, 서울대학교 환경대학원 석사학위논문.

최완석 · 이영인(2002), “유전자 알고리즘을 이용한 이중목적 주기변동 신호시간 결정모형 개발”, 「대한교통학회지」 20(5): 81-98.

한국교통연구원, 「전국 교통혼잡비용 추정과 추이 분석」

한여희 · 김영찬(2012), “지체시간과 연동성을 동시에 고려하는 신호교차로 시뮬레이션 모형의 개발”, 「한국ITS학회논문지」, 11(6): 15-22.

Gartner N.H and Deshpande R.(2009), “Harmonic Analysis and Optimization of Traffic Signal Systems,” *Transportation and Traffic Theory 2009: Golden Jubilee*.

Gartner N.H and Deshpande R.(2010), “Traffic Flow Characteristics in

Coordinated Signal Systems”, *Summer 2010 Meeting of Traffic Flow Theory and Characteristics Committee (AHB45) of the Transportation Research Board*.

Park B.K.(1998), *Development of Genetic Algorithm-Based Signal Optimization Program for Oversaturated Intersection*, Ph. D. Dissertation. Texas A & M Univ.

Peytchev E.T., Bargiela A. and Gessing R.(1996), “A predictive macroscopic city traffic simulation model”, *Proceedings of European Simulation Symposium ESS'96*, Genoa, (2): 38-42.

Razali N.M., Wah Y.B. and Sciences M.(2011), “Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests”, *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2(1): 21-33.

Roess, Roger P. and Prassas, Elena S. and McShane, William R.(2004), *Traffic Engineering 3rd ed.*, Prentice Hall.

Srinivasan, D., Choy, M. C., Cheu, R. L.(2006). “Neural networks for real-time traffic signal control, Intelligent Transportation Systems”, *IEEE Transactions on INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS*, 7(3): 261-272.

<부록 1> 연동방향 지체도의 정규성 검정 결과 (교차로 6개)

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
기존모형	.066	30	.200	.991	30	.995*
기존연동모형	.077	30	.200	.982	30	.882*
신규모형(6)	.090	30	.200	.949	30	.154*

a : Lilliefors 유의확률 수정

\* :  $p > 0.05$

<부록 2> 비교모형별 연동방향 지체도 등분산성 검정 결과 (교차로 6개)

비교모형	Levene의 등분산 검정	
	F	Sig.
기존모형-기존연동모형	2.375	.129*
기존모형-신규모형(6)	11.267	.001
기존연동모형-신규모형(6)	4.027	.049

\* :  $p > 0.05$

<부록 3> 비교모형별 연동방향 지체도의 t-검정 및 Welch's t-검정 결과

비교모형	독립표본 t-검정 및 Welch's t-검정			
	가정	t	df	Sig.
기존모형-기존연동모형	등분산성	10.674	58	.000
기존모형-신규모형(6)	이분산성	15.906	42.225	.000
기존연동모형-신규모형(6)	이분산성	4.971	50.300	.000

\* :  $p > 0.05$

<부록 4> 연동방향 연동성의 정규성 검정 결과 (교차로 6개)

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
기존모형	.106	30	.200	.979	30	.790*
기존연동모형	.084	30	.200	.981	30	.859*
신규모형(6)	.145	30	.105	.938	30	.081*

a : Lilliefors 유의확률 수정

\* :  $p > 0.05$



<부록 5> 비교모형별 연동방향 연동성 등분산성 검정 결과 (교차로 6개)

비교모형	Levene의 등분산 검정	
	F	Sig.
기존모형-기존연동모형	2.888	.095*
기존모형-신규모형(6)	21.972	.000
기존연동모형-신규모형(6)	10.066	.002

\* :  $p > 0.05$

<부록 6> 비교모형별 연동방향 연동성의 t-검정 및 Welch's t-검정 결과

비교모형	독립표본 t-검정 및 Welch's t-검정			
	가정	t	df	Sig.
기존모형-기존연동모형	등분산성	10.002	58	.000
기존모형-신규모형(6)	이분산성	22.404	37.543	.000
기존연동모형-신규모형(6)	이분산성	13.532	43.303	.000

\* :  $p > 0.05$

<부록 7> 네트워크 지체도의 정규성 검정 결과 (교차로 6개)

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
기존모형	.099	30	.200	.932	30	.056*
기존연동모형	.156	30	.060	.940	30	.092*
신규모형(6)	.129	30	.200	.962	30	.342*

a : Lilliefors 유의확률 수정

\* :  $p > 0.05$

<부록 8> 비교모형별 네트워크 지체도 등분산성 검정 결과 (교차로 6개)

비교모형	Levene의 등분산 검정	
	F	Sig.
기존모형-기존연동모형	21.711	.000
기존모형-신규모형(6)	1.300	.259*
기존연동모형-신규모형(6)	26.773	.000

\* :  $p > 0.05$

<부록 9> 비교모형별 네트워크 지체도의 t-검정 및 Welch's t-검정 결과

비교모형	독립표본 t-검정 및 Welch's t-검정			
	가정	t	df	Sig.
기존모형-기존연동모형	이분산성	-104.867	33.834	.000
기존모형-신규모형(6)	등분산성	1.418	58	.161*
기존연동모형-신규모형(6)	이분산성	107.187	31.737	.000

\* :  $p > 0.05$

<부록 10> 네트워크 연동성의 정규성 검정 결과 (교차로 6개)

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
기존모형	.109	30	.200	.933	30	.058*
기존연동모형	.099	30	.200	.983	30	.892*
신규모형(6)	.092	30	.200	.967	30	.472*

a : Lilliefors 유의확률 수정

\* :  $p > 0.05$

<부록 11> 비교모형별 네트워크 연동성 등분산성 검정 결과 (교차로 6개)

비교모형	Levene의 등분산 검정	
	F	Sig.
기존모형-기존연동모형	17.641	.000
기존모형-신규모형(6)	2.128	.150*
기존연동모형-신규모형(6)	27.686	.000

\* :  $p > 0.05$

<부록 12> 비교모형별 네트워크 연동성의 t-검정 및 Welch's t-검정 결과

비교모형	독립표본 t-검정 및 Welch's t-검정			
	가정	t	df	Sig.
기존모형-기존연동모형	이분산성	-76.075	39.310	.000
기존모형-신규모형(6)	등분산성	10.063	58	.000
기존연동모형-신규모형(6)	이분산성	84.291	34.239	.000

\* :  $p > 0.05$

<부록 13> 연동방향 지체도의 정규성 검정 결과 (양방향 대칭 교통량)

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
기존모형	.190	30	.007	.898	30	.007
기존연동모형	.145	30	.108	.967	30	.464*
신규모형(6)	.147	30	.097	.947	30	.139*

a : Lilliefors 유의확률 수정

\* :  $p > 0.05$

<부록 14> 로그 변환한 연동방향 지체도의 정규성 검정 결과

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
기존모형	.198	30	.004	.874	30	.002
기존연동모형	.129	30	.200	.976	30	.709*
신규모형(6)	.127	30	.200	.969	30	.513*

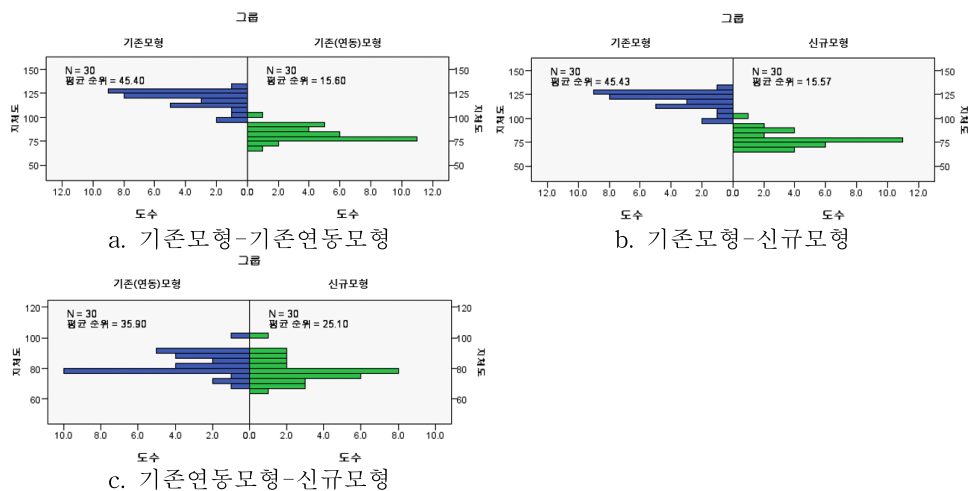
a : Lilliefors 유의확률 수정

\* :  $p > 0.05$

<부록 15> 비교모형별 연동방향 지체도 Mann-Whitney U 검정 결과

비교모형	Mann-Whitney U 검정				
	모형	N	평균순위	U	Sig.
기존모형-기존연동모형	기존	30	45.40	3.000	.000
	기존연동	30	15.60		
기존모형-신규모형(6)	기존	30	45.43	2.000	.000
	신규	30	15.57		
기존연동모형-신규모형(6)	기존연동	30	35.90	288.000	.017
	신규	30	25.10		

\* :  $p > 0.05$



<부록 16> 비교모형별 네트워크 지체도 Mann-Whitney U 검정 결과

<부록 17> 연동방향 연동성의 정규성 검정 결과 (양방향 대칭 교통량)

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
기존모형	.162	30	.044	.918	30	.024
기존연동모형	.091	30	.200	.990	30	.990*
신규모형(6)	.151	30	.080	.925	30	.035

a : Lilliefors 유의확률 수정

\* :  $p > 0.05$

<부록 18> 로그 변환한 연동방향 연동성의 정규성 검정 결과

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
기존모형	.177	30	.017	.886	30	.004*
기존연동모형	.076	30	.200	.989	30	.988*
신규모형(6)	.129	30	.200	.940	30	.092*

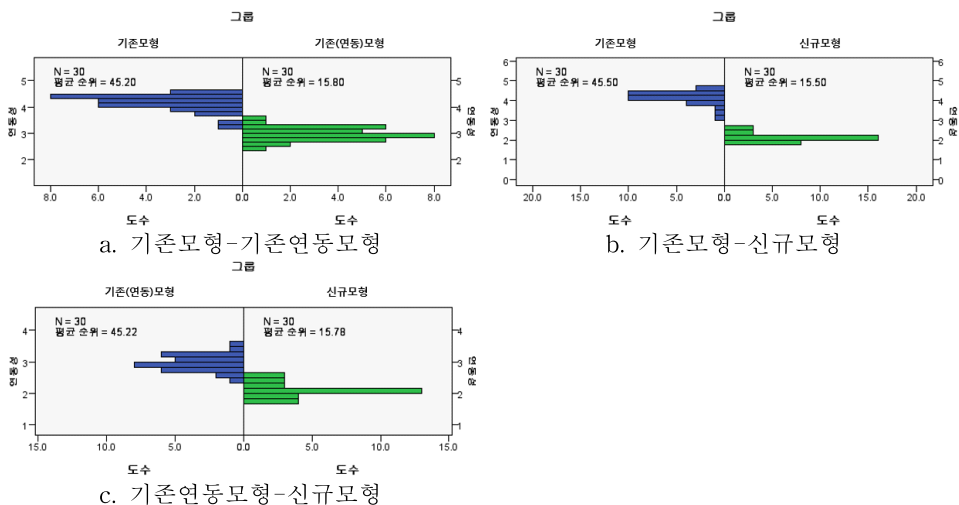
a : Lilliefors 유의확률 수정

\* :  $p > 0.05$

<부록 19> 비교모형별 연동방향 연동성 Mann-Whitney U 검정 결과

비교모형	Mann-Whitney U 검정				
	모형	N	평균순위	U	Sig.
기존모형-기존연동모형	기존	30	45.20	9.000	.000
	기존연동	30	15.80		
기존모형-신규모형(6)	기존	30	45.50	.000	.000
	신규	30	15.50		
기존연동모형-신규모형(6)	기존연동	30	45.22	8.500	.000
	신규	30	15.78		

\* :  $p > 0.05$



<부록 20> 비교모형별 연동방향 연동성 Mann-Whitney U 검정 결과

<부록 21> 네트워크 지체도의 정규성 검정 결과 (양방향 대칭 교통량)

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
기존모형	.168	30	.030	.922	30	.031
기존연동모형	.091	30	.200	.972	30	.583*
신규모형(6)	.225	30	.000	.685	30	.000

a : Lilliefors 유의확률 수정

\* : p > 0.05

<부록 22> 로그 변환한 네트워크 지체도의 정규성 검정 결과

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
기존모형	.162	30	.044	.928	30	.044
기존연동모형	.085	30	.200	.971	30	.574*
신규모형(6)	.213	30	.001	.705	30	.000

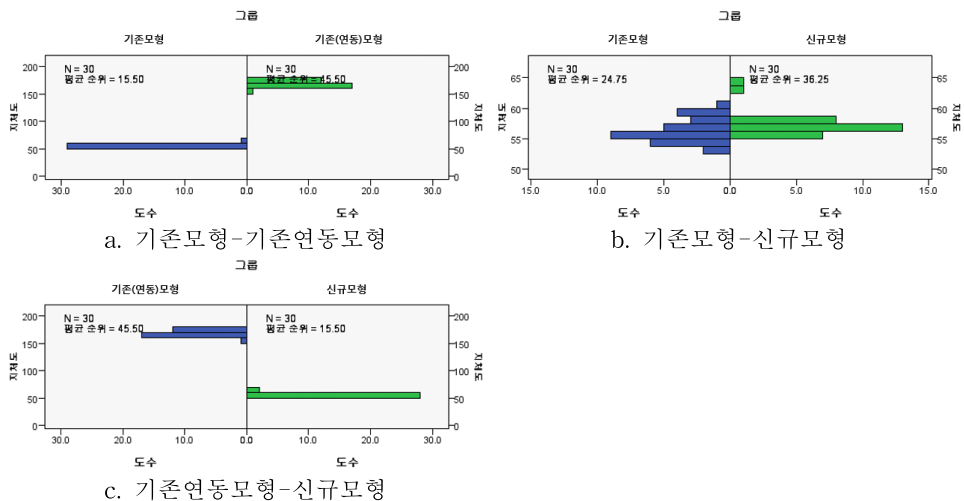
a : Lilliefors 유의확률 수정

\* : p > 0.05

<부록 23> 비교모형별 네트워크 지체도 Mann-Whitney U 검정 결과

비교모형	Mann-Whitney U 검정				
	모형	N	평균순위	U	Sig.
기존모형-기존연동모형	기존	30	15.50	900.000	.000
	기존연동	30	45.50		
기존모형-신규모형(6)	기존	30	24.75	622.500	.011
	신규	30	36.25		
기존연동모형-신규모형(6)	기존연동	30	45.50	.000	.000
	신규	30	15.50		

\* : p > 0.05



<부록 24> 비교모형별 연동방향 연동성 Mann-Whitney U 검정 결과

<부록 25> 네트워크 연동성의 정규성 검정 결과 (양방향 대칭 교통량)

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
기존모형	.143	30	.119	.962	30	.338*
기존연동모형	.124	30	.200	.951	30	.184*
신규모형(6)	.137	30	.156	.957	30	.267*

a : Lilliefors 유의확률 수정

\* :  $p > 0.05$

<부록 26> 비교모형별 네트워크 연동성 등분산성 검정 결과

비교모형	Levene의 등분산 검정	
	F	Sig.
기존모형-기존연동모형	13.798	.000
기존모형-신규모형(6)	1.832	.181*
기존연동모형-신규모형(6)	18.383	.000

\* :  $p > 0.05$

<부록 27> 비교모형별 네트워크 연동성의 t-검정 및 Welch's t-검정 결과

비교모형	독립표본 t-검정 및 Welch's t-검정			
	가정	t	df	Sig.
기존모형-기존연동모형	이분산성	-92.214	36.723	.000
기존모형-신규모형(6)	등분산성	8.067	58	.000
기존연동모형-신규모형(6)	이분산성	97.459	34.696	.000

\* :  $p > 0.05$



## Abstract

Development of a cycle-free signal control model  
considering traffic signal progression

Advised by  
Prof. Lee, Young In

December, 2014

submitted by  
Kim, Gur Joong

Department of Environmental Planning Graduate  
School of Environmental Studies  
Seoul National University



A cycle-free signal control model is one of real-time signal control models on which researchers recently have conducted active studies. This model can minimize the signal delay for transit vehicles by adjusting the cycle length of every cycle in response to its traffic volume. But at the same time it has a limit not to achieve the traffic signal progression(coordination) of adjacent traffic signals.

Typically, in order to provide for signal progression, all signals should use the same cycle length. However, it is hard to achieve signal progression in the cycle-free signal control model as it varies lengths of cycle in response to traffic of each intersection. Even if there is a method to consider signal progression, it is difficult to provide for efficient signal progression because, despite of the importance of precise forecast of intersection condition such as queue length, there are a plenty of variables which are hard to forecast in the real world.

Nonetheless, there is a time when signal progress is necessary. For example, major urban corridors in which asymmetric two-way traffic occurs especially in peak hours could be more efficiently controlled by considering signal progression of a particular direction rather than optimizing traffic signal not considering the progression.

This study aims at developing a new cycle-free signal control model that achieve signal progression without performance degradation and reviewing its effectiveness in terms of signal progression and delay by comparing it with an existing cycle-free signal control model. Also, in order to enhance its signal coordination level, this study proposes a method that can minimize an offset prediction error by adjusting the offset on a real-time basis using the

gap between forecasting value and measuring value.

In a small network comprised of two intersections, It was found that delay and progression level of the coordinated direction are enhanced by 23% and 32% respectively, and that delay and progression level of all directions are enhanced by -1% and 2% respectively. When it was reviewed that the differences of performance scales are statistically significant, it was found that all differences turn out to be significant except for a delay difference of all directions. This result means that a proposed new model is highly capable of enhancing delay and progression for the coordinated direction without degradation of delay and progression for the other direction.

To review whether it is possible to apply to a network comprised of multiple intersections, model application results under the condition of various signal progression size(the number of coordinated intersection) for 6 intersections were compared. The results came out that a scenario about a network whose all six signals are progressive shows the highest performance. Compared to an existing model, it is analyzed that delay and progression level of the coordinated direction get enhanced by 33% and 49% respectively, and 1% and 5% for all directions.

Lastly, the effects of application on a network with asymmetric two-way traffic were compared. In terms of the coordinated direction, It is found that improvement in delay and progression level in asymmetric two-way traffic are 33% and 49% respectively, and that improvement in delay and progression level in symmetric two-way traffic are 34% and 49% respectively. These figures indicate that

delay and progression level increase slightly under the condition of symmetric two-way traffic. But in terms of all directions, It is found that improvement in delay and progression level in asymmetric two-way traffic are 1% and 5% respectively, and that improvement in delay and progression level in symmetric two-way traffic are -2% and 4% respectively. These figures indicate that delay and progression level decrease under the condition of symmetric two-way traffic.

In conclusion, a new model suggested by this study is, compared to an existing model, capable of enhancing progression of a coordinated direction without degradation on delay and progression of the other directions. Also, it is expected to have comparatively better outcomes when signal progression is applied to asymmetric two-way traffic rather than symmetric two-way traffic.

◆ Keywords : cycle-free, traffic signal control, signal progression, offset update

◆ Student Number : 2013-21982